

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

Ehitiste tuvastamine radarsatelliidi Sentinel-1A mõõtmiste põhjal

Anni Sisas

Juhendajad: PhD Kaupo Voormansik
MSc Tanel Tamm

Kaitsmisele lubatud:

Juhendajad:

Osakonna juhataja:

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Teoreetilised lähtekohad	5
1.1 Ülevaade tehisava-radarist.....	5
1.2 Ehitistelt radarisignaali tagasihajumist mõjutavad tegurid.....	8
1.2.1 Pinna karedus	8
1.2.2 Dielektriline läbitavus	10
1.2.3 Ehitiste orientatsioon radari kiirgusvihu suhtes	10
1.2.4 Lainepikkus	12
1.2.5 Polarisatsioon	13
1.2.6 Langemisnurk.....	14
1.2.7 Ruumiline lahutus	14
1.3 Tehisava-radari põhised meetodid ehitiste tuvastamiseks.....	15
2. Ehitiste tuvastamise lähteandmed ja metoodika.....	18
2.1 Lähteandmed	18
2.2 Andmetöötlus.....	20
2.3 Klassifitseerimistäpsuse hindamine.....	24
3. Tulemused ja arutelu	26
3.1 Ehitiste tuvastamine kuiva ilma radaripiltidelt.....	26
3.2 VV- ja VH-kanali piltide kombineerimine	32
3.3 Ilmastikutingimuste mõju ehitiste tuvastamisele.....	35
3.4 Tõusva ja laskuva orbiidi piltide kombineerimine	38
Kokkuvõte	40
Summary	42
Tänuavaldused.....	44
Kasutatud kirjandus.....	45

Sissejuhatus

Linnastumise kiire kasv sai alguse 20. sajandi keskpaigas ning on jätkuvalt väga aktuaalne. Kui 2014. aastal elas linnades 54% kogu maailma rahvastikust, siis aastaks 2050 prognoositakse linnarahvastiku osakaalu tõusu 66%-ni (ÜRO, 2014). Eriti kiiresti kasvavad linnad arengumaades. Aina kiirenev linnastumine loob küll palju uusi võimalusi, aga ka väljakutseid: laiali valgunud linnad hõivavad rohkem maad, vajavad rohkem energiat ja infrastruktuuri arendust. Linnade jätkusuutliku arengu tagamiseks on vaja tõhusat planeerimispoliitikat ja mõistlikku ressursside kasutamist. Selleks on tähtis omada täpset ja värsket infot linnade olukorrast praegu ja nende muutumise trendidest.

Linna-alade kaardistamiseks on erinevaid võimalusi. Traditsiooniliseks andmekogumise meetodiks on näiteks välitööd, mis on väga aja- ja tööjõukulukad. Arengumaades on tihti isegi primitiivne informatsioon linnade ulatusest vananenud, ebatäpne või seda lihtsalt ei eksisteeri (Baudot, 2001). Eriti just neis riikides võib linna-alade muutuste jälgimiseks pidada heaks võimaluseks kaugseiret. Maapinnalt tagasipeegeldunud päikesekiirgust mõõtvaid optilisi kaugseireinstrumente on linnade kaardistamisel juba ulatuslikult kasutatud. Paraku mõjutavad optiliste instrumentidega andmete kogumist ilmastik ja valgustingimused – pilves ilmaga või pimedal ajal pole võimalik maapinna kohta andmeid saada. Üheksakümnnendate esimesest poolest on hakatud aina enam kasutama aktiivse kaugseire instrumenti, tehisava-radarit. Erinevalt optilistest instrumentidest on tehisava-radaril oma kiirgusallikas ja see mõõdab iseenda välja saadetud signaali tagasihajunud kajasid. Seega saab andmeid koguda päikesevalgusest sõltumata ööpäevaringselt. Takistuseks ei ole ka pilved ja üksikud vihmapiisad, kuna mikrolained läbistavad neid väga hästi.

2014. aasta kevadel saadeti orbiidile Euroopa Kosmoseagentuuri Copernicus programmi esimene radarsatelliit Sentinel-1A. Tegu on väga hea ruumilise lahutuse ja vaateala suhtega (vastavalt 20x22 m ja 250 km) satelliidiga. Ülemaailmselt võimaldab see uusi andmeid saada iga 12 päeva järel, Eesti laiuskraadidel keskmiselt iga kuue päeva möödudes. Copernicus programmi tasuta ja avatud andmete jaotamise poliitika annab väga hea võimaluse kasutada neid andmeid ka linnade kasvamise mõõtmiseks.

Käesoleva töö eesmärk on töötada välja täpne meetodika ehitiste tuvastamiseks radaripiltidelt. Ehitistena vaadeldakse antud töös hooneid, rajatisi (välja arvatud teed) ja tootmisõuesid. Lähtuvalt töö eesmärgist püstitati järgnevad uurimisküsimused:

- Kui hästi eristuvad ehitised muudest aladest Sentinel-1A erineva polarisatsiooniga piltidelt saadud tulemitel?
- Kuidas mõjutavad ehitiste tuvastamist ilmastikutingimused?
- Kui palju parandab klassifitseerimistäpsust eri orbiidi piltide ja polarisatsioonikanalite kombineerimine?

Töö koosneb kolmest peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade radarseire valdkonnast, kirjeldatakse ehitistelt signaali tagasihajumist mõjutavaid tegureid ning radaripõhiseid meetodeid linna-alade kaardistamiseks. Teises peatükis tutvustatakse lähteandmeid, andmetöötlust ja klassifitseerimistäpsuse hindamise läbiviimist. Kolmandas peatükis esitatakse tulemused ja arutletakse kasutatud metoodika efektiivsuse üle Sentinel-1A andmetelt ehitiste tuvastamisel, mille raames vastatakse ka uurimisküsimustele.

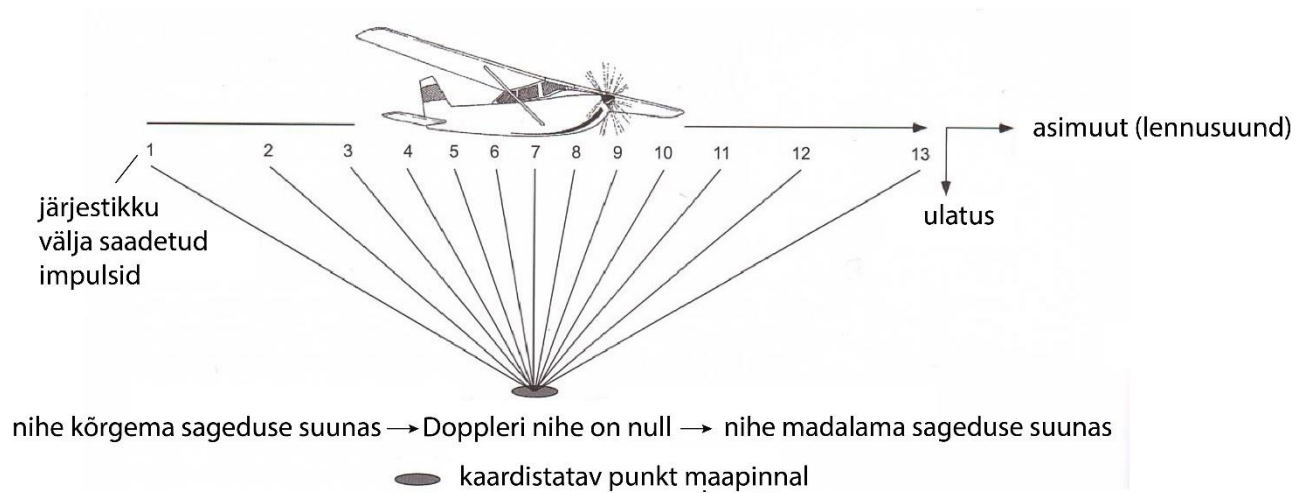
1. Teoreetilised lähtekohad

1.1 Ülevaade tehisava-radarist

Radar (ingl *RADAR* – *RA*dio *D*etection *And* *R*anging) on aktiivne kaugseireinstrument, mis saadab välja elektromagnetlainete impulsse ning võtab vastu tagasi hajunud ja peegeldunud kiirgust. Radar arendati sõjaliseks otstarbeks, leides kasutust Teise maailmasõja ajal vastase laevade ja lennukite tuvastamisel (Cumming & Wong, 2005). Tegu oli tõhusa luuresüsteemiga, kuna radarikiirte vähesse neeldumise tõttu atmosfääris oli võimalik andmeid koguda ka pilves ja vihmase ilmaga. Mõõtmisi sai teha ööpäevaringselt, kuna aktiivse instrumendina on radar varustatud oma kiirgusallikaga (Lillesand *et al.*, 2008).

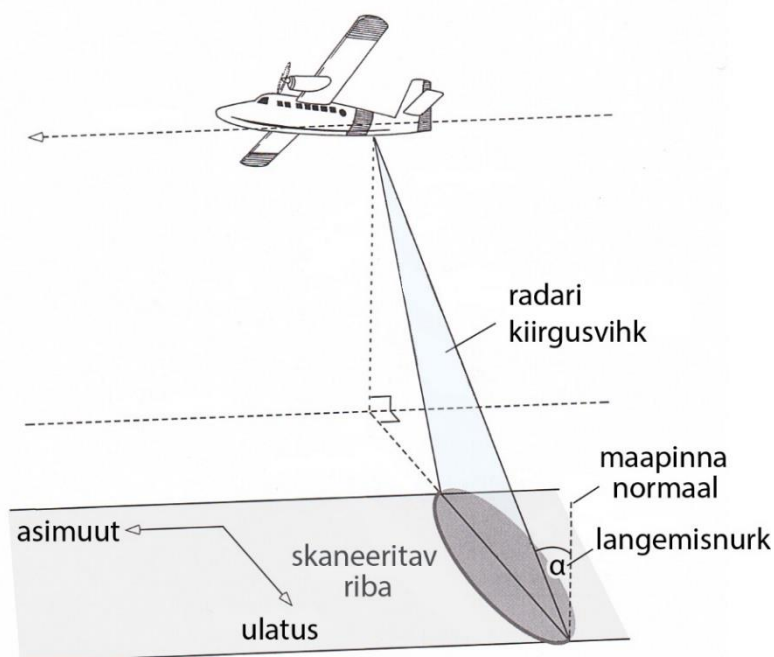
Esialgsed radarisüsteemid mõõtsid sihtmärgi kaugust ja suunda: kaugus leiti signaali levimise aja põhjal ning suund määrati kindlaks antenni vaatesuunaga. Objekti liikumiskiiruse tuvastamiseks rakendati Doppleri efekti: kui mõõta signaali sagedust objekti suhtes, siis objekti lähenedes radarile on tagasi tulnud signaali sagedus väljasaadetust kõrgem ja objekti eemaldudes madalam (joonis 1). Seejärel avastati, et täiendavat andmetöötlust rakendades on võimalik Doppleri efekti ära kasutada kõrgema lahutuse saamiseks radarikiirte levikuga risti oleval suunal. Tänu eelnimetatud kontseptsioonile leidis 1951. aastal USA matemaatik ja insener Carl Wiley, et radariga on võimalik maapinnast luua kahemõõtmelisi pilte ning seda meetodit hakati nimetama tehisava-radariks (ingl *SAR* - *S*ynthetic *A*perture *R*adar), viidates sellega signaalitöötluse abil loodud näiliselt väga pika antenni ehk tehisava efektile (Cumming & Wong, 2005).

Tavaliselt on tehisava-radar paigaldatud lennukile või satelliidile. Piki lennutrajektoori liikudes valgustab sensor maapealseid objekte ning salvestab neilt tagasi tulnud kiirguse. Tagasi tulnud signaale töödeldakse koos nagu nad oleksid kõik vastu võetud ühe palju suurema antenni poolt. Tegelikult on aga tegu üsna lühikese antenniga, mis joonis 1 põhjal on liikunud läbi 13 erineva asukoha (Purkis & Klemas, 2011).



Joonis 1. Järjestikku välja saadetud impulsse kasutatakse näiliselt pika antenni sünteesimiseks ja kõrgema lahutuse saamiseks asimuudi suunal. Joonis on kohandatud Purkis & Klemas (2011) järgi.

Tehisava-radari pildistamisgeomeetria on toodud joonisel 2. Platvorm, mis kannab külje peale vaatavat radari antenni, valgustab maapinda lühikeste mikrolaine impulssidega. Nurka maapinna normaali ja radarikiire vahel nimetatakse langemisnurgaks. Tavaline langemisnurk tehisava-radaril on $20\text{--}45^\circ$ (Lee & Pottier, 2009).

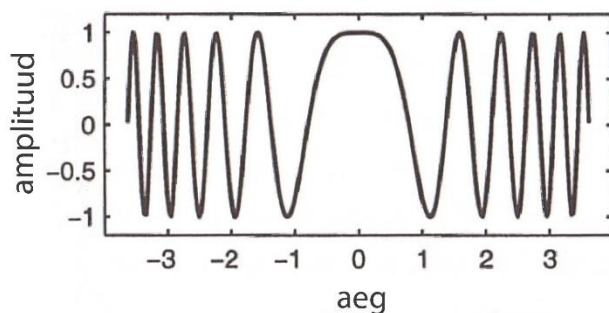


Joonis 2. Tehisava-radari pildistamisgeomeetria. Joonis on kohandatud Purkis & Klemas (2011) järgi.

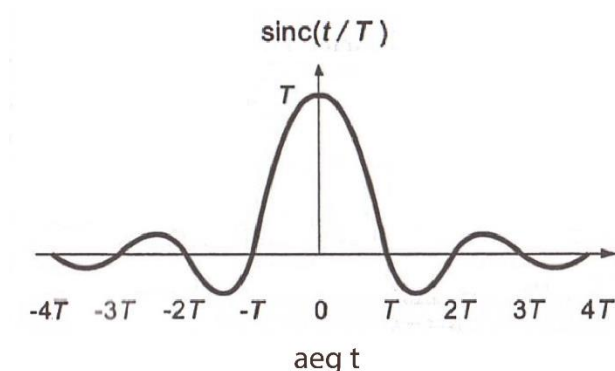
Radaripildi ruumiline täpsus on kirjeldatav kahe mõõtmega: lahutus asimuudi ja ulatuse suunas. Asimuudi ehk sensori liikumise suunas lahutuse saamine põhineb välja saadetud signaali sageduse teadmisel ja Doppleri ajalool, mis omistab tagasipeegeldustele nende korrektsed asukohad radaripildi asimuudi teljel (Cumming & Wong, 2005).

Ulatuse suund on paralleelne radarikiire levikusuunaga ning risti asimuudiga. Ulatuse suunas saadakse lahutus signaali levimiseks kulunud aja põhjal: pärast impulsi välja saatmist jõuab peegeldus esimesena tagasi sensorile kõige lähemalt objektilt maapinnal, siis järjest kaugemalt kuni antenni kiirusvihk saab otsa. Tagasi tulnud signaal paigutatakse aja mõõtmise põhjal õigele kaugusele radaripildi ulatuse teljel (Cumming & Wong, 2005). Ulatuse suunas lahutuse saamiseks skaneerib tehisava-radar maapinda alati lennusuuna suhtes küljele, kuna otse alla skaneerides poleks võimalik ajaliselt eristada, kummalt poolt radarist signaal tagasi tuli.

Veel kõrgema lahutuse saamiseks saadavad enamik kaasaegseid tehisava-radareid ühikimpulsside asemel välja sirtsu (ingl *chirp* ehk lineaarselt sagedusmoduleeritud signaal) (joonis 3). Tagasi tulnud signaali töödeldakse täiendavalt, mille tulemusel saadakse ajas ja ruumis väga lühike sinc-funktsiooni kujuline koste (joonis 4) (Cumming & Wong, 2005).



Joonis 3. Sirts. Joonis on kohandatud Cumming & Wong (2005) järgi.



Joonis 4. Sinc-funktsioon. Joonis on kohandatud Cumming & Wong (2005) järgi.

1.2 Ehitistelt radarisignaali tagasihajumist mõjutavad tegurid

Tehisava-radari poolt kogutud andmestikku kujutatakse tavaliselt halltoonis rasterpildina. Iga piksli heledus näitab, kui palju kiirgust jõudis tagasi sensorini piksli alla kuuluvalt alalt maapinnal. Mida rohkem kiirgust tagasi tuli, seda heledam paistab objekt.

Radarisignaali tagasihajumine maapinnalt on kombinatsioon objektile iseloomulikest parameetritest nagu pinna karedus (ebatasasus), materjali dielektriline läbitavus, objekti orientatsioon radari kiirgusvihu suhtes ning radarispetsiifilistest parameetritest nagu lainepikkus, polarisatsioon, langemisnurk ja ruumiline lahutus (Lee & Pottier, 2009). Järgnevalt seletatakse eelpool nimetatud tegurite sisu ning vaadeldakse, kuidas need mõjutavad kiirguse tagasihajumist ehitistelt.

1.2.1 Pinna karedus

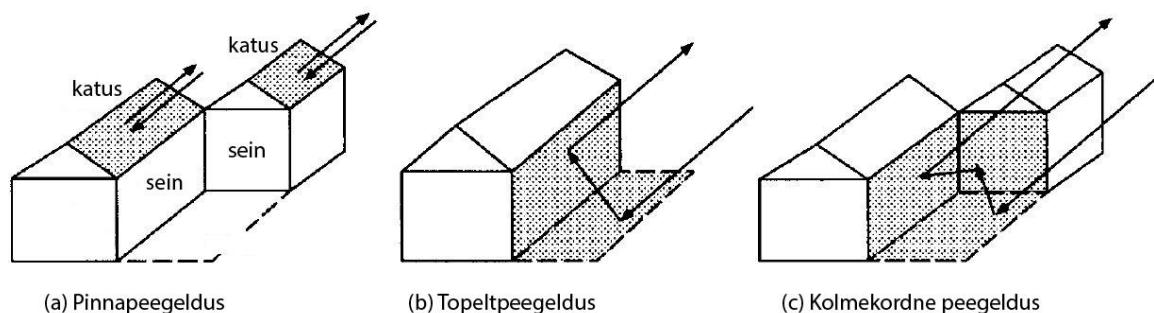
Pinna karedus (ingl *surface roughness*) on tavaliselt peamine faktor, mis määrab objektide heleduse radaripildil. Kas pind näib radari jaoks sile või kare, sõltub lainepikkusest ja langemisnurgast (Natural Resources Canada, 2014). Pind paistab sile, kui pinna kõrguse muutlikkus on palju väiksem kui radari lainepikkus. Kui pinna kõrguse muutlikkus läheneb lainepikkuse suurusle või ületab seda, siis näib pind kare. Seega on pind seda karedam, mida lühem on lainepikkus ja siledam, mida suurem on lainepikkus. Pinnad paistavad ka seda siledamad, mida suurem on langemisnurk.

Kuna sile pind põhjustab peeglilist peegeldumist (st peegeldunud kiired on langeva kiire suhtes sama nurga all) harilikult sensorist eemale, siis jõuab ainult väike osa väljasaadetud elektromagnetkiirgusest tagasi sensorini. Sel põhjusel paistavad radaripildil näiteks sile veepind ja maanteed tavaliselt tumedates toonides. Kare pind hajutab aga kiirgust enam-vähem võrdselt kõigis suundades (difuusselt) ja seega hajub märkimisväärne osa kiirgusest tagasi sensorini. Seetõttu paistavad näiteks küntud põllud ja metsad võrreldes tasaste veealade ja maanteedega heledamad.

Tagasihajumine linna-aladelt on kombinatsioon peeglilisest peegeldusest ja difuussest tagasihajumisest, millest esimene on tavaliselt oluliselt tugevam (Dong *et al.*, 1997). Ehitised paistavad erinevalt paljudest teistest peeglilistest peegeldajatest (nt veekogudest ja maanteedest) väga heledad nende omase geomeetria pärast, mistõttu jõuab suur osa

väljasaadetud kiirgusest tagasi sensorini. Seega on ehitistele iseloomulikud enamasti väga heledad pikslid.

Kolm hoonetele kõige iseloomulikumat tagasihajumise mehhanismi on pinnapeegeldus katustelt, topeltpeegeldus: maapind + sein ja kolmekordne peegeldus: maapind + sein + sein (joonis 5) (Dong *et al.*, 1997).



Joonis 5. Hoonestusele iseloomulikud tagasihajumise mehhanismid. Joonis on kohandatud Dong *et al.* (1997) järgi.

Mida rohkem radarikiir murdub, seda nõrgem on tagasi tulnud signaal, kuna linna-alad mõningal määral neelavad ja hajutavad kiirgust (Forster, 2006). Seetõttu annab ehitistelt tugevaima signaali pinnapeegeldus. Sensorini jõuab signaal pinnapeegelduselt siis, kui katuse ja radari vaatesuuna vaheline nurk on täisnurk või sellele väga lähedane. Kui katus pole radari vaatesuuna suhtes 90° nurga all, peegeldub enamik kiirgusest mujale ja hoone paistab radaripildil tume. Kuna tihtipeale pole katus radari vaatesuuna suhtes „õige“ nurga all, siis seetõttu on linna-aladel kõige sagedamini esinevaks tagasihajumise mehhanismiks topeltpeegeldus. Linna-aladel on topelt- (diheedral) ja kolmekordsetel (triheedral) peegeldustel suurem osakaal ka seetõttu, et neil juhtudel saab geomeetriselt näidata, et suvalise sisse tuleva kiirguse nurga puhul suunatakse see alati samas suunas tagasi (Lee & Pottier, 2009). Topeltpeegeldusega võrreldes on kolmekordne peegeldus veidi väiksema osakaaluga, kuna selleks peab leiduma kolm omavahel ristuvat tasandit ning radarikiir murdub rohkem (Forster, 2006).

Kindel seos esineb ka radari tagasihajumise intensiivsuse ja hoonete suuruse vahel. Mida suurem on hoone, seda rohkem esineb seal topeltpeegeldusi. Seega on radarisignaal tugevam tööstus- ja äripiirkondades, kus hooned on võrreldes elamualadega enamasti suuremad (Ticehurst *et al.*, 1996).

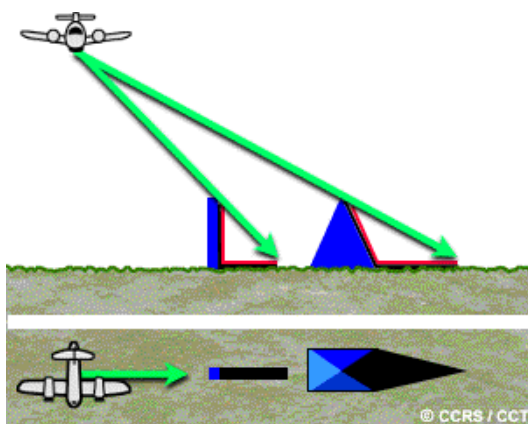
1.2.2 Dielektriline läbitavus

Objekti dielektriline läbitavus (ingl *relative permittivity*) kirjeldab materjali reageerimist elektriväljale, kuidas objekt radarikiiri peegeldab, juhib või läbi laseb. Dielektriline läbitavus kasvab, mida suurem on materjali peegelduvus ja juhtivus. Vee dielektriline läbitavus on väga kõrge, mistõttu paistavad radaripildil niiske ebatasane muld ja taimestik väga heledad (Euroopa Kosmoseagentuur, 2014c). Seega peaks ehitisi olema parem tuvastada kuivades ilmastikutingimustes tehtud piltidelt, kus heleduse kontrast ehitiste ja taimestiku vahel on suurem.

Ka metallist objektide dielektriline läbitavus on väga kõrge. See põhjustab väga tugevat signaali tagasi tulekut näiteks metallist sildadelt ja raudteedelt, mis annab neile radaripildil väga heleda väljanägemise (Euroopa Kosmoseagentuur, 2014c). Märkimisväärselt tugevamat signaali tagasihajumist võib eeldada ka suurtelt, mitmekorrukselistelt hoonetelt, mis sisaldavad rohkem metalli (raudbetooni, metallkarkasse ja -torusid, vihmaveerenne, aknaid) kui väiksemad hooned (Forster, 2006). Seega paistavad radaripildil tööstus- ja äripiirkonnad elamualadega võrreldes üldiselt heledamad, kuna hooned on neis piirkondades tavaliselt tihedamalt paigutatud, neis on palju kõrgeid ehitisi, mis sisaldavad ka rohkem metalli ja annavad tugevama peegelduse. Tellistest või puidust seinte ja kivikatustega hoonete radarisignaali tagasihajumine on nõrgem. Kuna need materjalid on väikese dielektrilise läbitavusega, siis suur osa kiirgusest läbib hoone pinda, mistõttu jõuab väiksem osa kiirgusest tagasi sensorini (Ticehurst *et al.*, 1996).

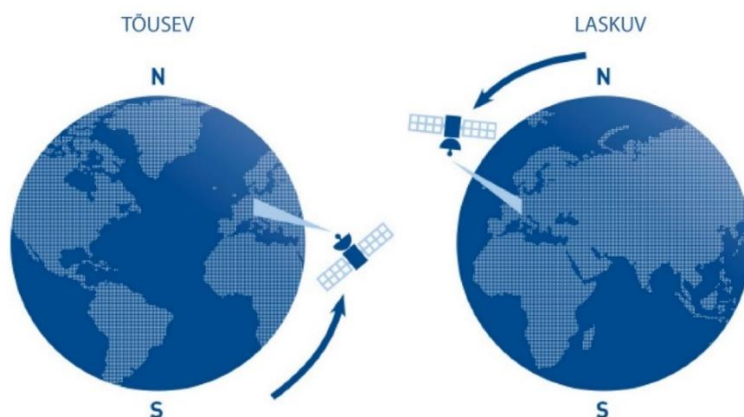
1.2.3 Ehitiste orientatsioon radari kiirgusvihi suhtes

Radarisignaali tagasihajumisele avaldab märkimisväärset mõju ka ehitiste orientatsioon radari kiirgusvihi suhtes. Kõige tugevam tagasihajumine esineb nendel ehitistel, mis on radarikiirte suhtes risti, st paralleelsed radari lennusuunaga (Raney, 1998). Tagasihajumise intensiivsus langeb märgatavalt, kui ehitise orientatsioon radarikiirte suhtes muutub 90°-lt umbes 25°-ni. Sellise nurga juures ja alla selle sõltub tagasi tulnud signaal ainult pinna karedusest, materjali dielektrilistest omadustest ja ruumilisest tagasihajumisest (Forster, 2006). Langenud kiirguse suhtes ehitise vastasküljel on maapind osaliselt kaetud ehitise varjuga (joonis 6). Sellised alad paistavad radaripildil tumedana, sest sealt signaali tagasi ei tulnud (Purkis & Klemas, 2011).



Joonis 6. Varjude teke. Punasega tähistatud alad on radaripildil täielikult varjuga kaetud (Natural Resources Canada, 2013).

Samas on eelpool kirjeldatud radarisignaali hoonete orientatsioonist sõltuvus iseloomulik ainult sellistele radaritele, mis saadavad välja ja võtavad vastu sama polarisatsiooniga kiirgust (nt HH või VV). Ristkanalil (nt HV või VH) annavad tugevama tagasipeegelduse radarkiirte suhtes 45° nurga all olevad ehitised. Seega parandab ristkanali ja traditsioonilise HH või VV kanali koos kasutamine erinevate nurkade all paiknevate ehitiste tuvastamist oluliselt (vt alapeatükki 1.2.5). Kuna ehitiste orientatsioon mõjutab oluliselt nende esiletulemist radaripildil, siis on erineva nurga all olevate ehitiste tõhusamaks tuvastamiseks soovitatav ka erineva vaategeomeetriaga tõusva ja laskuva orbiidi (joonis 7) pilte kombineerida (Basly *et al.*, 1999).



Joonis 7. Tõusev orbiit (satelliidi liikumine põhjapooluse suunas) ja laskuv orbiit (satelliidi liikumine lõunapooluse suunas). Joonis on kohandatud Tele-Rilevamento Europa (2015) põhjal.

Tagasihajumise sõltuvus objekti orientatsioonist pole iseloomulik ainult linna-aladele. Nii mõjutab objektide heledust radaripildil näiteks ka põllukultuuride ridade paiknemine radarikiirte suhtes (Lillesand *et al.*, 2008). Tagasihajumise märkimisväärne sõltuvus orientatsioonist muudab linna-alade tuvastamise keerukaks ainuüksi tagasihajumise heleduse põhjal.

1.2.4 Lainepikkus

Tehisava-radari instrumendid töötavad mikrolaine piirkonnas lainepikkusel 1 mm – 1 m ning enimkasutatavad sagedusvahemikud on X- (sagedus 8-12 GHz, lainepikkus umbes 3 cm), C- (sagedus 4-8 GHz, lainepikkus umbes 5 cm) ja L-laineala (sagedus 1-2 GHz, lainepikkus umbes 23 cm) (Lillesand *et al.*, 2008).

Radari lainepikkus mõjutab signaali tagasihajumist linna-aladelt mitmel viisil (Xia & Henderson, 1997). Esiteks näivad pinnad pikematel lainepikkustel siledamad kui lühematel, mistõttu on pikema lainepikkuse kasutamisel maapinnalt radarini tagasi tulnud signaal nõrgem (vt alapeatükki 1.2.1). Näiteks L-lainealas hajub kuni 5 cm kõrguserinevustega maapinnalt tagasi vähe kiirgust ja maapind paistab radaripildil tume. Sama pind paistab aga heledam lühema lainepikkusega X-lainealas suurema tagasihajumise osakaalu tõttu. Teiseks on lühema lainepikkusega tehisava-radari süsteemidel tavaliselt kõrgem ruumiline lahutus, mis võimaldab radaripildil detaile paremini eristada. Kolmandaks sõltub lainepikkusest radarikiirte taimestiku ja maapinna läbistusvõime. Mida pikem on lainepikkus, seda parem on signaali läbistusvõime.

Üldiselt peetakse hoonestatud alade tuvastamisel sobivamaks lühema lainepikkuse kasutamist (nt X-laineala andmete kasutamine L-laineala asemel), kuna radaripilt on siis detailirikkam ning hooned tulevad paremini esile. Lühema lainepikkuse kasutamise eeliseks võib pidada ka selle suuremat tundlikkust pinna karedusele (Lillesand *et al.*, 2008). Samas esineb näiteks X-laineala andmete kasutamisel rohkem ruumilist tagasihajumist taimestiku võrast, mistõttu võivad suurte puudega ümbritsetud hooned radarile varjatuks jääda. Pikemad lainepikkused läbistavad taimestikku hästi, võimaldades tuvastada ka puude all asuvaid hooneid. Samas paistavad pikemate lainepikkuste kasutamisel pinnad siledamad, mistõttu signaali tagasihajumise osakaal maapinnalt väheneb. Seetõttu võib olla erinevaid maakattetüüpe raskem eristada, kuna tagasihajumine looduslikelt aladelt ja ehitistelt on sarnasem kui lühema lainepikkuse puhul (Xia & Henderson, 1997).

Linna-alade tuvastamisel ei eelistata aga alati lühemaid lainepikkuseid. Näiteks Henderson & Herrig (1996) leidsid erinevate lainepikkuste mõju uurimisel hoonestuse tuvastamisele, et visuaalsel radaripiltide tõlgendamisel andis kõige parema tulemuse hoopis L-laineala radaripilt ning kehvemini oli võimalik hoonestust tuvastada vastavalt C- ja X-laineala radaripildilt.

Linna-alade tuvastamisel annab paremaid tulemusi erineva laineala radariandmestike üheaegne kasutamine. Näiteks on leitud, et X- ja L-laineala HH- ja HV-polarisatsiooniga andmestiku korraga kasutamine võimaldab tuvastada 84% linna-aladest, samal ajal kui radaripiltide eraldi tõlgendamisel (X-laineala HH- kanali pilt; X-laineala HV-kanali pilt, L-laineala HH- kanali pilt, L-laineala HV-kanali pilt) tuvastati linna-aladest vaid 52% (Henderson & Xia, 1998).

1.2.5 Polarisatsioon

Polarisatsioon kirjeldab elektromagnetlainete võnketasandit: domineeriva võnketasandiga lained on polariseeritud lained. Radarseires kasutatakse enamasti HH, HV, VH ja VV polarimeetrilisi kanaleid. Esimene täht tähistab välja saadetud ja teine täht vastu võetud signaali polarisatsiooni. Näiteks tähendab HH, et radar saadab välja ja võtab vastu horisontaalselt polariseeritud kiirgust ning VH tähendab, et saadetakse välja vertikaalselt polariseeritud kiirgust ja võetakse vastu horisontaalselt polariseeritud kiirgust. Kuna kiirguse polarisatsioon ja faas muutuvad eri liiki peegeldustel erinevalt, siis võimaldab erineva polarisatsiooniga radarikiirguse kasutamine saada uuritavate objektide kohta täiendavat informatsiooni.

HH- ja VV-kanali pildil on peamiseks tagasihajumise mehhanismiks pinnapeegeldus ning VH- ja HV-kanali pildil ruumiline tagasihajumine (Xia & Henderson, 1997). Kuna radarini tagasi jõudnud pinnapeegeldus on alati tugevam kui ruumiline tagasihajumine, siis on üldiselt ka HH- ja VV-kanali signaal hoonetelt võrreldes VH- ja HV-kanaliga tugevam. Signaal dihedraal nurkpeegeldajalt on väga tugev siis, kui peegeldavad pinnad on radarikiirte suhtes umbes 90° nurga all, st mõlemad pinnad on radari lennusihi (asimuut) paralleelsed. Selline nurkpeegeldus tuleb selgesti esile just HH- ja VV-kanali piltidel (Hussin, 1995). VH- ja HV-kanalil annavad tugevama peegelduse 90°-st erineva nurga all olevad ehitised (Henderson & Xia, 1998).

Hoonestuselt võib vähesse difuusse hajumise tõttu eeldada VH- ja HV-kanalis pigem nõrka signaali, difuusse tagasihajumine on märkimisväärselt taimestikult (Lee & Pottier, 2009). Näiteks puud võivad anda kõrge VH- ja HV-kanali signaali, mis võib aidata eristada elamu- ja äripiirkondi, kuna elamualadel on tavaliselt rohkem puud (Forster *et al.*, 1997).

1.2.6 Langemisnurk

Signaali tagasihajumist mõjutab ka langemisnurk (ingl *incidence angle*), milleks nimetatakse nurka radarikiire ja maapinna normaali vahel (joonis 2). Suurema langemisnurga kasutamisel saadakse ulatuse suunal parem ruumiline lahutus, mis võimaldab tuvastada väiksemaid ehitisi ja komplekssemaid maakatteüksuseid. Samas põhjustab suuremate langemisnurdade kasutamine radaripildil pikemaid varjusid ja nõrgemat tagasihajumist. Arvestades ruumilise lahutuse ja radari varjude mõju, on leitud, et optimaalne langemisnurk ehitiste tuvastamiseks on 40-45° (Xia & Henderson, 1997).

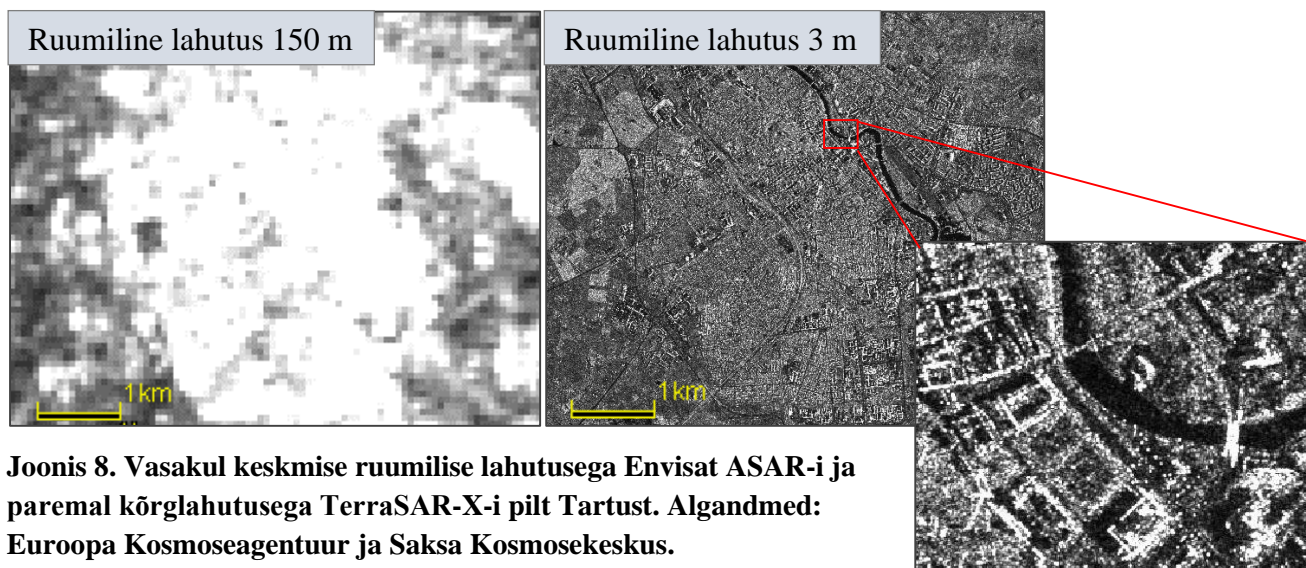
Langemisnurk mõjutab ka erinevate tagasihajumismehhanismide esinemist. Väikese langemisnurga puhul esineb tavaliselt tugevam pinnapeegeldus. Ruumiline tagasihajumine madala dielektrilise läbitavusega pinnalt on erinevate langemisnurdade puhul ühtlasem (Euroopa Kosmoseagentuur, 2014a).

1.2.7 Ruumiline lahutus

Ruumiline lahutus (ingl *spatial resolution*) määrab, kui suur on väikseim eristatav objekt või maa-ala satelliidipildil. Optilistel sensoritel vastab ruumiline lahutus tavaliselt piksli suurusele, näiteks 30 m lahutuse puhul võib öelda, et piksli suurus maapinnal on 30 x 30 m. Radaripiltidel on tavaliselt piksel lahutusest väiksem, kuna pilti on ülediskreeditud (ingl *over-sampled*) (Rees, 1999).

Kaugseireandmete optimaalne ruumiline lahutus sõltub kaardistavatest objektidest. Kui tahetakse mõõta üksikute hoonete suurust ja piire, siis peaks ruumiline lahutus olema väiksem kui hoonete mõõtmed (Jensen, 2000). Üldiselt on kõrgema ruumilise lahutusega piltidelt võimalik paremini tuvastada väikseid asustatud alasid. Liiga kõrge lahutuse puhul mõõdetakse aga objektidesisest heterogeensust: ilmuvad liigsed ja soovimatud detailid (hoonete puhul näiteks katuse servad, rõdu nurgad), piltide tõlgendamine võib muutuda keerukamaks ning klassifitseerimistäpsus väheneda (Purkis & Klemas, 2011). Kui eesmärgiks on linna-alasid piiritleda, siis võib optimaalseks pidada sellised satelliidipilte, mille ruumiline lahutus on üksikute hoonete mõõtmetest suurem. Kuna linnakeskkond on väga mitmekesine, siis keskmise või madala ruumilise lahutuse puhul tuleb arvestada, et üks piksel võib hõlmata erinevaid komponente (hooneid, kõnniteid, parke jne). Näited keskmise ja kõrge ruumilise lahutusega radaripiltidest on toodud joonisel 8.

Jensen (2000) kohaselt on linna-alade piiritlemiseks minimaalne nõutav lahutus 20-100 m ning elamurajoonide piiritlemisel 5-20 m. Täpsemalt hoonete tüüpide määramiseks (nt ühepereelamud, korterelamud) peetakse sobivaimaks kuni 5 m lahutusega satelliidipilte.



Joonis 8. Vasakul keskmise ruumilise lahutusega Envisat ASAR-i ja paremal kõrglahutusega TerraSAR-X-i pilt Tartust. Algandmed: Euroopa Kosmoseagentuur ja Saksa Kosmosekeskus.

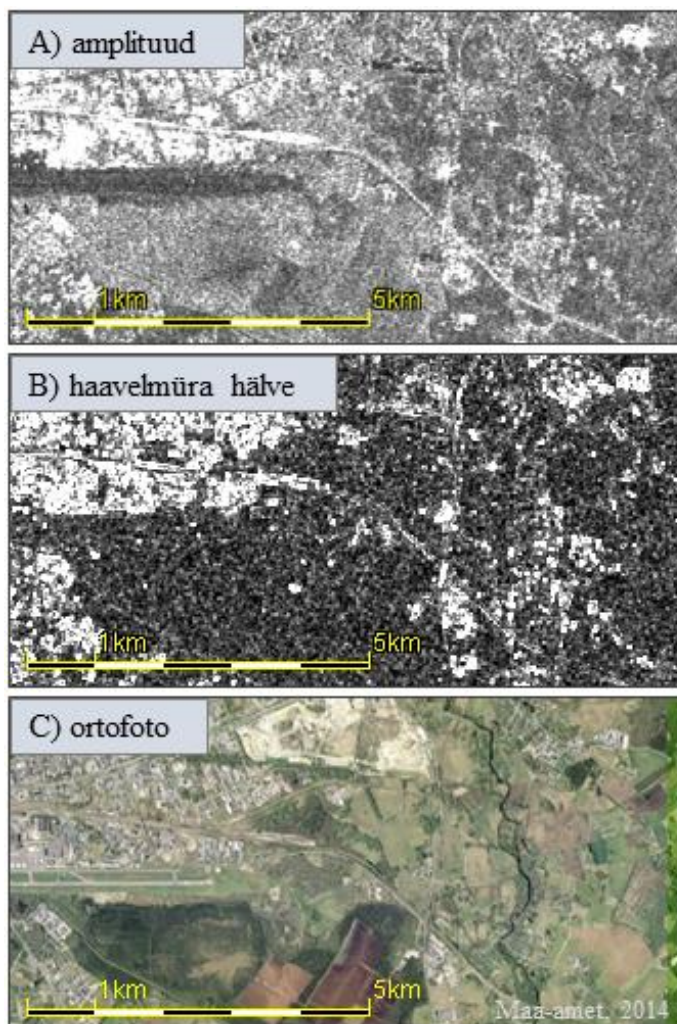
1.3 Tehisava-radari põhised meetodid ehitiste tuvastamiseks

Ehitisi on võimalik tuvastada neilt tagasihajunud kiirguse intensiivsuse põhjal. Linna-aladel esineb tavaliselt tugevam tagasihajumine kui looduslikel aladel. Heledamaid alasid võib radaripildil lugeda ehitisteks (Del Frate *et al.*, 2008). Siiski on tagasihajumise intensiivsuse kasutamisel usaldusväärseks linna-alade tuvastamiseks vaja ka muid andmeallikad, kuna väga heleda signaali võivad sarnaselt ehitistele anda ka näiteks laevad ja üleujutatud metsad.

Ehitiste tuvastamiseks võib kasutada ka asjaolu, et inimtekkeliste objektide ja loodusalade tagasihajumise lokaalselt arvutatud statistikud on erinevad. Sellele asjaolule tuginevaks meetodiks on näiteks haavelmüra divergents ehk haavelmüra hälve (Esch *et al.*, 2010; Taubenböck *et al.*, 2011; Taubenböck *et al.*, 2012). Haavelmüra (ingl *speckle*) on radaripildile iseloomulik omadus, mistõttu paistavad ka ühtlase heledusega alad (näiteks rohumaad, veekogud ja mets) radaripildil mürased. On täheldatud, et mida heledam on tegelikkuses mingi ala, seda suurem on selle ala piksliväärtuste varieeruvus. Seetõttu on heledamatele aladele iseloomulikud laiemad histogrammid ja tumedamatele aladele kitsamad, kuid heleduse keskväärtuse ja standardhälbe (histogrammi laiuse) suhe jääb alati samaks. Osutub, et selline seaduspära kehtib ainult looduslike alade puhul. Mida rohkem esineb mingil alal inimtekkelisi objekte, seda suurem on keskväärtuse ja standardhälbe suhte erinevus teoreetilisest konstandist. Haavelmüra divergents mõõdabki tegeliku histogrammi laiuse

erinevust teoreetilisest laiusest. Võrreldes radaripildi amplituudi info kasutamisega, tulevad haavelmüra divergentsi meetodi põhiselt loodud piltidel ehitised oluliselt selgemalt esile (joonis 9). Haavelmüra divergentsi rakendamisel 12-s linnapiirkonnas saadi kogutäpsuseks 70-95% (Esch *et al.*, 2012). Ka käesolevas töös kasutatakse ehitiste tuvastamiseks lokaalselt arvutatud statistikute põhist meetodit, keskväärtuse ja mediaani vahe, mida on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2.2.

Haavelmüra divergentsi kasutamisel esines valesti klassifitseerimist sageli elamurajoonides, kus väikesed ja hajali asuvad majad olid ümbritsetud puude ja hekkidega. Vigu võimendas see, kui hoonete orientatsioon sensori vaatesuuna suhtes oli ebasoodne, st väikese nurga all. Mõnikord tõlgendati ekslikult ehitistena ka kivised kõrbed ja väga ebauhtlase võra katvusega troopikametsad ja liustike kare pind (Esch *et al.*, 2012).



Joonis 9. Tallinna lennujaama ümbrus. (A) Sentinel-1A amplituudi VV-kanali pilt. (B) Haavelmüra hälbe VV-kanali pilt. Algandmed: Euroopa Kosmoseagentuur. (C) Ortofoto (Maa-amet, 2014).

Ehitisi on võimalik tuvastada ka interferomeetrilise koherentsuse põhjal (Strozzi & Wegmuller, 1998). Interferomeetriline koherentsus on stabiilsuse mõõde. Stabiilsetele objektidele nagu ehitised on iseloomulik kõrgem koherentsus (0,8 - 0,9) kui rohkem muutuvatele, näiteks taimkattega aladele (0,3 - 0,4) ruumilise ja ajalise dekorrelatsiooni tõttu. Ka sel meetodil on piirangud: lage maa ilma taimestikuta (näiteks küntud põllud, kivid mägises piirkonnas) on samuti kõrge koherentsusega ning võivad seetõttu ehitistega kergesti sassi minna.

Täiendavat informatsiooni inimtekkeliste alade tuvastamiseks võimaldab ka täispolarimeetrilise andmestiku ehk kõigi nelja polarisatsiooni (HH, HV, VH, VV) kasutamine (Li *et al.*, 2010). Kuna täispolarimeetrilisi andmeid veel massiliselt operatiivselt suurte alade kohta ei toodeta, siis on sellele tuginevad meetodid piiratud praktilise väärtusega.

Ehitiste tuvastamiseks saab kasutada ka tehisava-radari põhiseid digitaalseid kõrgusmudeleid, näiteks TanDEM-X missioonilt (Esch *et al.*, 2012). Linna-alade kõrgusandmestik erineb looduslikest aladest, kus reljeef muutub tavaliselt sujuvamalt.

2. Ehitiste tuvastamise lähteandmed ja metoodika

2.1 Lähteandmed

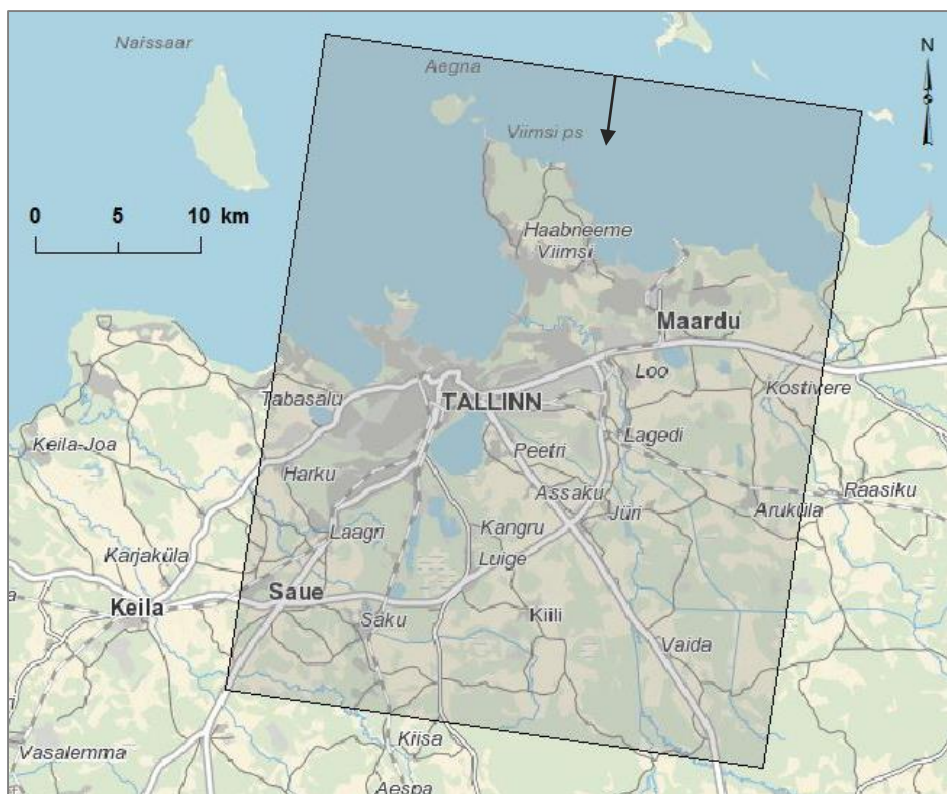
Käesolevas töös kasutatakse Euroopa Kosmoseagentuuri radarsatelliidi Sentinel-1A andmeid. Tegu on Euroopa Copernicus kaugseireprogrammi esimese satelliidiga, mis saadeti orbiidile 3. aprillil 2014 ning selle regulaarne seiretöö algas 2014. aasta suvel. Sentinel-1A mõõteinstrumentiks on tehisava-radar.

Sentinel-1A-l on neli erineva ruumilise lahutuse ja pildistamisulatusega töörežiimi: *Stripmap*, *Interferometric Wide Swath (IW)*, *Extra-Wide Swath (EW)* ja *Wave* režiim. Käesolevas töös kasutatakse IW andmeid, mis on Sentinel-1A kõige enam kasutatav töörežiim. Radarsatelliidil on väga hea vaateala ja ruumilise lahutuse suhe: pildistamisulatus IW-režiimis on 250 km ning ruumiline lahutus 5x20 m. Käesolevas töös kasutatavad radariandmed on tarnitud Level-1 *Ground Range Detected (GRD) High resolution (H)* formaadis, kus algne ruumiline lahutus 5x20 m on üldistatud ning lahutusvõime on seega 20x22 m. Piksli suuruseks on sealjuures 10x10 m (Euroopa Kosmoseagentuur, 2013), mis tähendab, et andmed on ülediskreeditud ja ruumiline lahutus ei võrdu piksli suurusega.

Sentinel-1A instrumendiks on C-laineala radar, mis töötab lainepikkusel 5,6 cm ning radarikiirguse langemisnurk IW-režiimis on 29 – 46°. Satelliit töötab korraga ühes (HH või VV) või kahes polaristatsioonis (HH+HV või VV+VH). Käesolevas töös kasutatakse VV+VH andmeid, mis tähendab, et saadeti välja vertikaalselt polariseeritud kiirgust ning pool antenni võttis kiirgust vastu vertikaalselt ja teine pool horisontaalselt polariseeritult. VV- ja VH-polarisatsiooniga andmestike võrdlemine võimaldab lähemalt uurida, kumma kanali (VV või VH) pildil ehitised paremini eristuvad.

Sentinel-1A kogub andmeid päikesesünkroonsel orbiidil kõrgusega 693 km. Kogu maismaa katvus saavutatakse iga 12 päeva järel, kuid Eesti kohta on tulenevalt asukohast suurtel laiuskraadidel võimalik andmeid tihemini saada. Satelliidipildid on tasuta kättesaadavad Euroopa Kosmoseagentuuri veebilehelt <https://scihub.esa.int/>.

Kuna Eesti kohta on ehitistest olemas täpsed andmed, valiti käesolevas töös uurimisalaks Tallinn ja selle lähiümbrus (joonis 10). Tallinn ja Harjumaa on ühed kõige tihedama asustusega alad Eestis ning seal on palju erineva suuruse, kuju ja orientatsiooniga ehitisi.



Joonis 10. Uurimisala Harjumaal. Hall ristkülik tähistab satelliidipiltidelt välja lõigatud ala ning see on orienteeritud vastavalt Sentinel-1A lennutrajektoorige (tähistatud noolega). Aluskaart: Maa-amet.

Andmetöötlemiseks kasutati Sentinel-1A pilte kolmest kuupäevast, mida on lähemalt kirjeldatud tabelis 1. Radariandmete valikul võeti arvesse, et ehitiste tuvastamiseks on teoreetiliselt sobivaimad pildid ajast, mil ruumiline tagasihajumine taimestikult on raagus puude tõttu väiksem, mistõttu peaksid ehitised paremini esile tulema. Kuna radar on tundlik pinnase veesisaldusele ja vihmajärgselt paistavad sarnaselt linnadele erksad ja kontrastsed ka mitmed looduslikud alad, siis jälgiti kahe andmetöötlemiseks sobiva kuupäeva andmete valimisel asjaolu, et enne pildi tegemist poleks uuritaval alal sademeid esinenud. Põhitöötlus (VV- ja VH-kanali pildil eraldi ning neid kombineerides) viidi läbi radariandmetel 23. oktoobrist 2014. Erineva orbiidi VV-kanali piltide kombineerimiseks kasutati kuiva ilma radariandmeid 23. oktoobrist ja 27. detsembrist 2014. Kuiva ja märja ilma radaripildi võrdluseks valiti pildid vastavalt 27. detsembrist 2014 ja 8. jaanuarist 2015. Tabelis 1 välja toodud keskmise õhutemperatuuri ja sademete andmed põhinevad uurimisalal paikneval Tallinn-Harku aeroloogiajaama mõõtmistel (Riigi Ilmateenistus, 2015).

Tabel 1. Andmetöötluseks valitud Sentinel-1A IW piltide parameetrid.

kuupäev	kellaaeg	orbiit	langemisnurk	keskmine õhutemperatuur 5h enne ülelendu	sademeid 5h enne ülelendu	lumikatte paksus kell 8 hommikul
23.10.2014	06:33	laskuv	43,9-45,6°	-4,9°C	-	-
27.12.2014	17:56	tõusev	33,9-36,0°	-5,3°C	-	10 cm
08.01.2015	17:56	tõusev	33,9-36,0°	+0,7°C	2,9 mm	4 cm

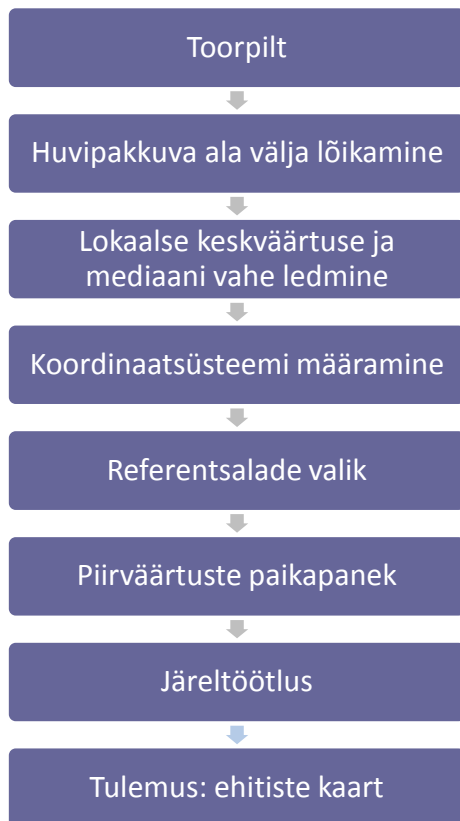
2.2 Andmetöötlus

Käesolevas töös rakendatakse hoonestatud alade tuvastamiseks tagasihajumise intensiivsuse lokaalsete statistikute põhist algoritmi. Metoodika on välja pakutud Tartu Observatooriumi teaduri Kaupo Voormansiku poolt ning teadaolevat pole sarnast meetodit varasemalt ehitiste tuvastamiseks kasutatud.

Radaripildilt ehitiste tuvastamise aluseks on asjaolu, et inimtekkeliste objektidega kaetud ja looduslike alade radari heleduse jaotusfunktsioonid on erinevad. Looduslike objektide (näiteks veekogude, metsade ja põldude) pikslite heledus varieerub vähe. Selliste alade pikslite heledusväärtused vastavad ruumiliselt keskmistatud amplituudipildil normaaljaotuse sarnasele Chi jaotusele (Lee & Pottier, 2009) ning seega on looduslike objektide keskväärtus ja mediaan peaaegu võrdsed.

Inimtekkelistel aladel on aga sujuvalt muutuva heledusega loodusele omaste pikslite kõrval iseloomulikud väga heledad ehitiste pikslid. Ehitised paistavad enamasti väga heledad radarikiirte topeltpeegelduse tõttu: radarikiire peegeldumine sensorilt ehitise küljele, küljelt maapinnale ja maapinnalt tagasi sensorini. Sellise peegeldumismehhanismi domineerivuse tõttu pole ehitiste heleduse jaotusfunktsiooni kuju enam Chi ja keskväärtus pole mediaaniga võrdne. Ehitiste tuvastamiseks kasutatakse heleduse keskväärtuse ja mediaani erinevust: loodusaladel on erinevus nullilähedane ja inimtekkelistel objektidel on erinevus suurem. Tegu on lokaalsetel statistikutel põhineva meetodiga, keskväärtus ja mediaan arvutatakse liikuva aknaga. Andmetöötluses kasutati keskmistavat akent suurusega 5x5 pikslit.

Töötlusprotsess koosneb kuuest sammust, mis on välja toodud joonisel 11.

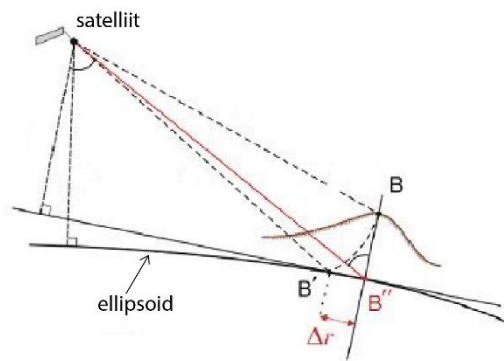


Joonis 11. Töötlusahel ehitiste tuvastamiseks.

Järgnevalt kirjeldatakse töötlusahela iga sammu lähemalt.

- 1. Huvipakkuva ala välja lõikamine.** Üks Sentinel-1A IW GRDH pilt hõlmab ligikaudu 150x250 km suurust maa-ala ning on mahult umbes 1,6 GB. Seetõttu on arvutuste kiirendamiseks otstarbekas huvipiirkonda kitsendada, lõigates välja ainult huvipakkuva maa-ala. Käesolevas töös on vaatluse alla võetud Tallinna linn ja selle lähiümbrus (joonis 10).
- 2. Lokaalse keskvaartuse ja mediaani vahe leidmine.** Esmalt leitakse kogu pildil lokaalse keskvaartuse ja lokaalse mediaani väärtused liikuva aknaga suurusega 5x5 pikslit. Seejärel rakendatakse piksel-piksli haaval lahutustehet keskvaartus – mediaan.
- 3. Koordinaatsüsteemi määramine.** Töötlemata tehisava-radari pildil salvestatakse pikslid radari koordinaatides tagasihajumise aja ja asimuudi telgedel. Seetõttu näivad kõrgemad objektid sensorile lähemal, kui nad tegelikult on (joonis 12). Seega on koordinaatsüsteemi määramise sammu juures maapinna moonutuste eemaldamiseks

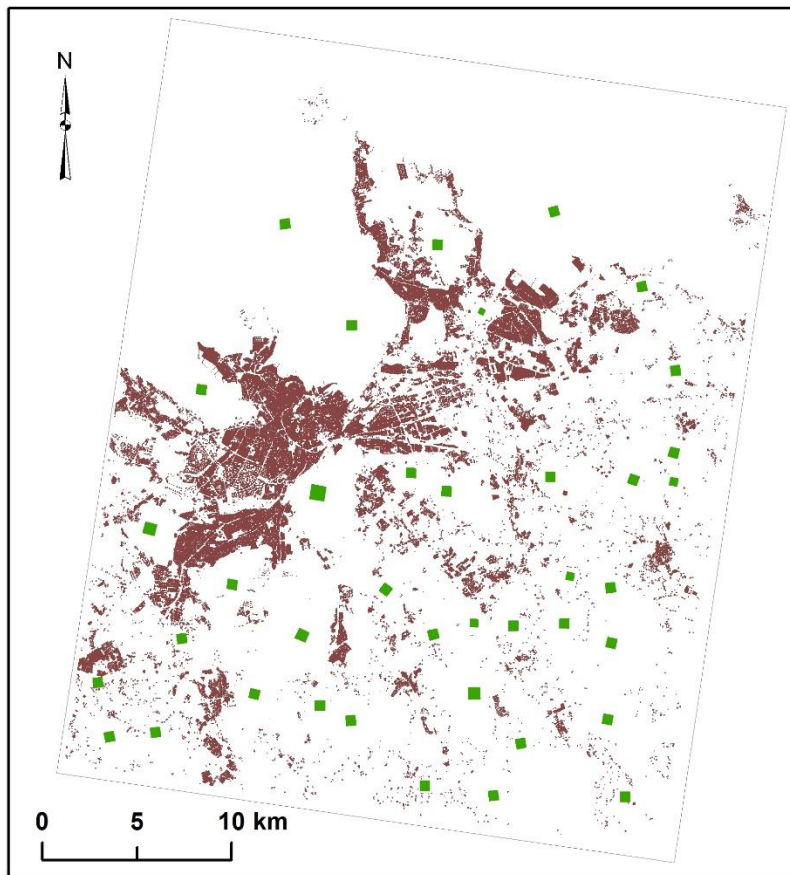
rakendatud geomeetrilist korrektsiooni, võttes arvesse kõrgusmodelit. Käesolevas töös kasutati geomeetriliseks korrektsiooniks SRTM-i (ingl *Shuttle Radar Topography Mission*) andmeid. SRTM-i jaoks koguti kõrgusandmeid 2000. aastal. Selle horisontaalne ruumiline lahutus Eesti alal on kolm kaaresekundit ehk umbes 90 meetrit ning vertikaalne täpsus 16 meetrit (NASA, 2005).



Joonis 12. Radar moonutab pildi geometriat: punkt B paikneb radaripildil punktis B', kuigi selle tegelik asukoht on B''. Joonis on kohandatud Euroopa Kosmoseagentuur (2010) järgi.

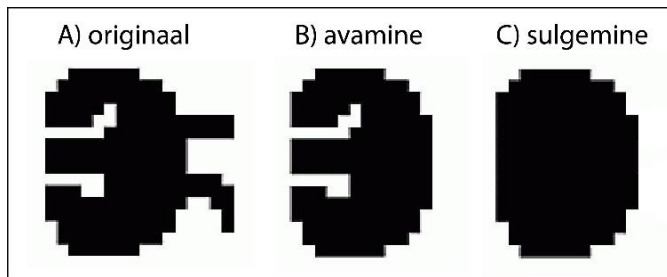
4. **Referentsalade valik.** Töös kasutati kahte tüüpi referentsalad: ehitistega kaetud alad ja loodusalad. Ehitiste referentsalade saamiseks loodi vastav pindobjektide kiht Eesti topograafia andmekogust (ETAK), mis hõlmas hooneid, katusealuseid, kasvuhooneid, tootmisõuesid, sildu, terrasse, tsisterned, mahuteid, galeriisid, reoveepumplaid, tribüüne, perroone, kütuse mahuteid, lägahoidlaid, platvorme, elevaatoreid, eskalaatoreid ja kirjelduseta olevaid „muid rajatisi“ 2015. aasta 9. jaanuari seisuga. Loodud ehitiste kiht koosneb peamiselt vertikaalsetest objektidest, mis annavad radarikiirte topeltpeegelduse tõttu tugeva signaali. Teid ehitiste referentskihti ei kaasatud, kuna tasapinnaliste objektidena peegeldub teedelt peaaegu kogu neile langenud kiirgusest radarist eemale. Seetõttu pole teede puhul tegu ehitistele valdavalt iseloomuliku tagasihajumisega. Looduse referentsalad joonistati vastavalt Maa-ameti 2014. aasta maikuu ortofotodele käsitsi, püüdes hõlmata võimalikult esinduslikke looduslikke alasid, mis ei sisaldaks inimtekkelisi objekte. Ehitiste ja looduse referentsalad on välja toodud joonisel 13.

Kuna radaripildi piksli suurus on 10 m ning aritmeetilise keskvärtuse ja mediaani arvutamise aken 5x5 pikslit, siis vaadeldava akna suurus maapinnal on 50x50 m. Ehitistele on loodud 20 m puhver, sest 10 m piksli suurusega andmete puhul loetakse ehitiseks ka see piksel, millest ehitis on tegelikult kuni 20 m kaugusel.



Joonis 13. Ehitiste ja looduse referentsalad, tähistatud vastavalt punakaspruuni ja rohelisega.

5. **Piirväärtuste paikapanek.** Rakendati tingimuslauset, et pikslid loetakse ehitiseks, kui need asuvad väljaspool 95% loodusalaade piksliväärtuste vahemikku. 95% loodusalaade piirid leiti, lugedes moodist mõlemale poole 47,5% pikslid. Piirväärtuste paikapanekul saadi binaarne tulempilt, kus iga piksel tähistas kas ehitist või loodusala.
6. **Järeltöötlus.** Pärast ehitiste ja loodusalaade vahelise piirväärtuse rakendamist kasutati saadud binaarsetel piltidel morfoloogilise avamise ja sulgemise filtrit 3x3 aknaga. Morfoloogilise avamise filtri rakendamisel jäetakse alles kõik ehitiste pikslid, kuhu 3x3 aken tervenisti sisse mahub ning ülejäänud üksikud pikslid eemaldatakse. Sarnaselt eemaldatakse morfoloogilise sulgemise filtri kasutamisel üksikud loodusalaade pikslid ehitisalade sees. Morfoloogilise avamise ja sulgemise filtreid kasutatakse pildi müra puhastamiseks: eemaldatakse tõenäoliselt vale binaarse väärtusega pikslid ning objektide piirjooned muutuvad sujuvamaks (joonis 14) (Smith, 1999).



Joonis 14. Morfoloogiliste filtrite rakendamine. (A) Originaalkujutis. (B) Morfoloogilise avamise filtri rakendamine originaalkujutisele. (C) Morfoloogilise sulgemise filtri rakendamine kujutisele B. Joonis on kohandatud Smith (1999) järgi.

Andmetöötluseks kasutati programme Sentinel-1 Toolbox 1.1.0 (Euroopa Kosmoseagentuur, 2015), NEST 5.0.16 (Euroopa Kosmoseagentuur, 2014b), täpsuse hindamiseks ArcGIS 10.2 (Esri, 2013) ning veamaatriksite analüüsiks MathCad Professional 10.1 (Mathsoft, 2001).

2.3 Klassifitseerimistäpsuse hindamine

Klassifitseerimistäpsuse hindamine koosneb kolmest põhisammust: a) valimi koostamine; b) valimi iga liikme kohta andmete kogumine; c) tulemuste analüüsimine. Üldise rusikareegli kohaselt soovitatakse väiksema kui ühe miljoni aakri (st ~404 686 ha) ja vähem kui 12 klassi puhul koguda iga klassi kohta minimaalselt 50 proovivõttu (Congalton & Green, 2009). Kuigi antud töös käsitletav uurimisala on ligikaudu 133 000 ha, otsustati usaldusväärsema hinnangu saamiseks ehitiste ja loodusala klassi puhul võtta kummagi kohta 500 kontrollpunkti. Kontrollpunktid genereeriti ehitiste ja loodusala kihile juhusliku jaotumise alusel. Kas punktid asusid ehitise kohal või mitte, kontrolliti ETAK-i andmetest antud tööks loodud ehitiste referentskihi põhjal (täpsemalt kirjeldatud alapeatükis 2.2).

Kogutud punktidest koostati veamaatriks, mille veergudes on kontroll- ehk referentsklassid, ridades prognoositud klassid ning lahtrites on välja toodud iga klassi esinemissagedus. Veamaatriks näitab lisaks õigesti ja valesti klassifitseeritud klassidele ka seda, kui palju on erinevad klassid omavahel segamini läinud. Veamaatriksi põhjal leiti kapa koefitsient, mis iseloomustab tabeli väärtuste erinevust juhuslikust tabelist, olles levinud vahendiks kaugeiremõõtmiste klassifitseerimistäpsuse hindamisel. Kapa koefitsiendi väärtus jääb vahemikku -1 kuni +1, kus +1 tähistab klasside täielikku vastavust ning -1 süstemaatiliselt valesti klassifitseeritud klasse (piksleid). Väärtus 0 iseloomustab juhuslikku vastavust.

Nominaalse tunnuse klasside vastavuse hindamiseks arvutatakse kapa indeks järgnevalt:

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}, \quad (\text{valem 1})$$

kus:

k – klasside arv veamaatriksis;

n_{ii} – vaatluspunktide arv reas i ja veerus i (asub peadiagonaalil);

n_{i+} - vaatluspunktide summa reas i;

n_{+i} – vaatluspunktide summa veerus i;

n – kõigi vaatluspunktide summa veamaatriksis.

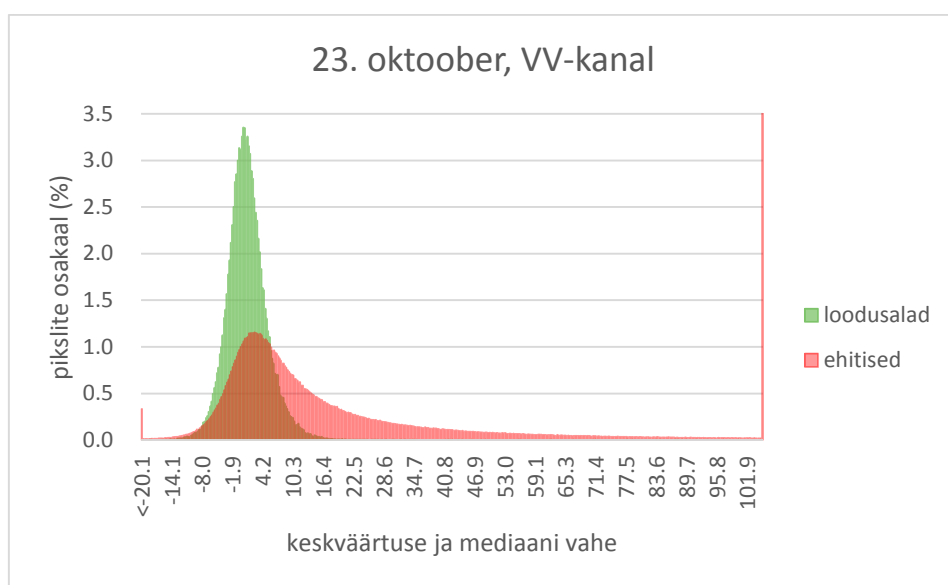
Kapa olulisuse hindamiseks kasutatakse Z-statistikut, mis näitab, kas klassifikatsioon on oluliselt parem kui juhuslikult saadud tulemus. 95% usaldusväärsuse juures on kriitiline väärtus 1,96. Kui Z-statistiku absoluutväärtus on suurem kui 1,96, siis on tulemus statistiliselt oluline ning klassifikatsioon on juhuslikust parem (Congalton & Green, 2009). Käesolevas töös välja toodud Z-statistikud põhinevad veamaatriksite võrdlemisel.

3. Tulemused ja arutelu

3.1 Ehitiste tuvastamine kuiva ilma radaripiltidelt

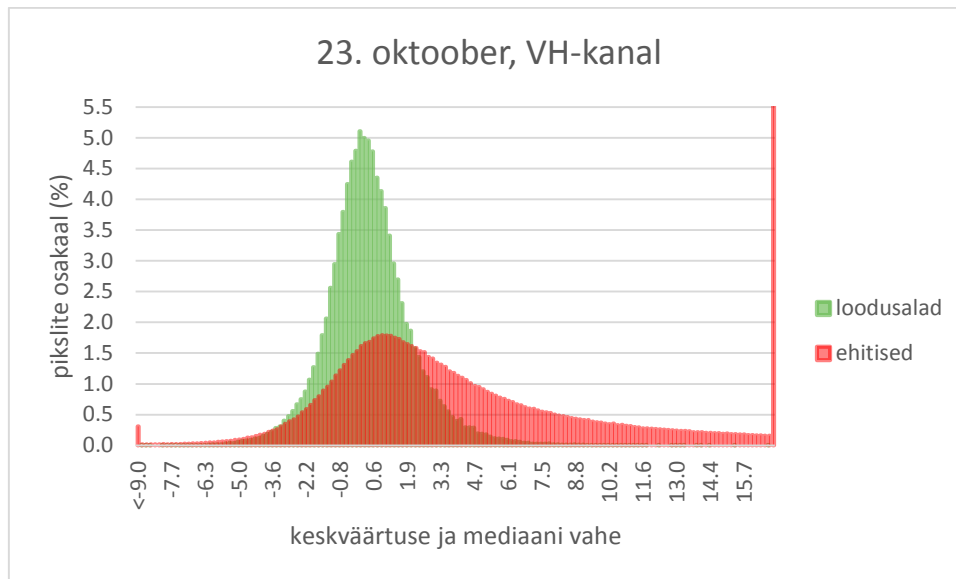
Kuiva ilma näiteks valitud Sentinel-1A laskuva orbiidi piltidel 23. oktoobrist 2014 viidi andmetöötlus eraldi läbi VV- ja VH-kanalis. Töödeldud radaripiltidele asetati peale ehitiste ja loodusalade referentskihid ning võrreldi nende alade keskväärtuse ja mediaani vahesid. Käesolevas töös loeti ehitisteks pikslid, mis jäid väljapoole 95% loodusalasid.

VV-kanalis jääb 95% pikslid loodusaladel vahemikku $-20,1 \dots 7,8$, mood on 0,3 (joonis 15). Ehitiste pikslitest kattub loodusaladega 47,2%.



Joonis 15. Loodusalade ja ehitiste keskväärtuse ja mediaani vahed 23. oktoobri VV-kanali radaripildil.

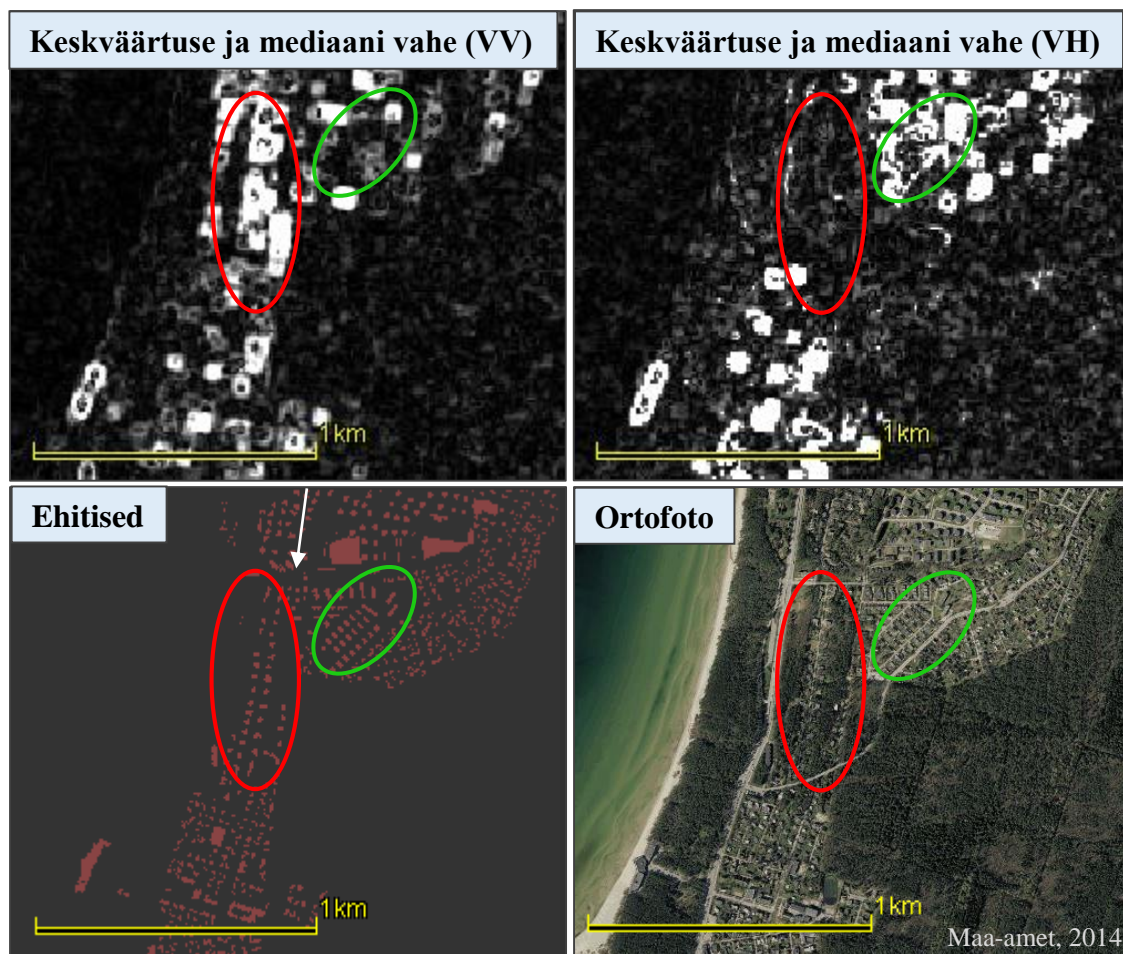
VH-kanalis jääb 95% pikslid loodusaladel vahemikku $-9,0 \dots 3,3$, mood on 0 (joonis 16). Ehitiste pikslitest kattub loodusaladega 51,1%.



Joonis 16. Loodusalade ja ehitiste keskväärtuse ja mediaani vahed 23. oktoobri VH-kanali radaripildil.

Mõlemas kanalis kattub suur osa ehitiste ja loodusalade pikslitest. Sellel on mitmeid põhjuseid. Esiteks kaasati ehitiste kihile 20 m puhvri joonistamisega märkimisväärne osa loodusalasid. Kasutatava Sentinel-1A GRDH formaadis pildi ruumiline lahutus on 20x22 m, mistõttu on suur osa pikslid nn segupikslid erinevatest objektidest ja nähtustest. Seega sisaldab radaripildil osa ehitiste referentsalade pikslid tulenevalt ruumilisest lahutusest ka rohelist, mis põhjustab ehitiste ja loodusalade jaotusfunktsioonide sarnasust. 20x22 m ruumilise lahutuse tõttu pole võimalik Sentinel-1A mõõtmistest kätte saada üksikute ehitiste kontuure, Sentinel-1A andmed on sobivamad regionaalsel tasemel linna-alade piiritlemiseks.

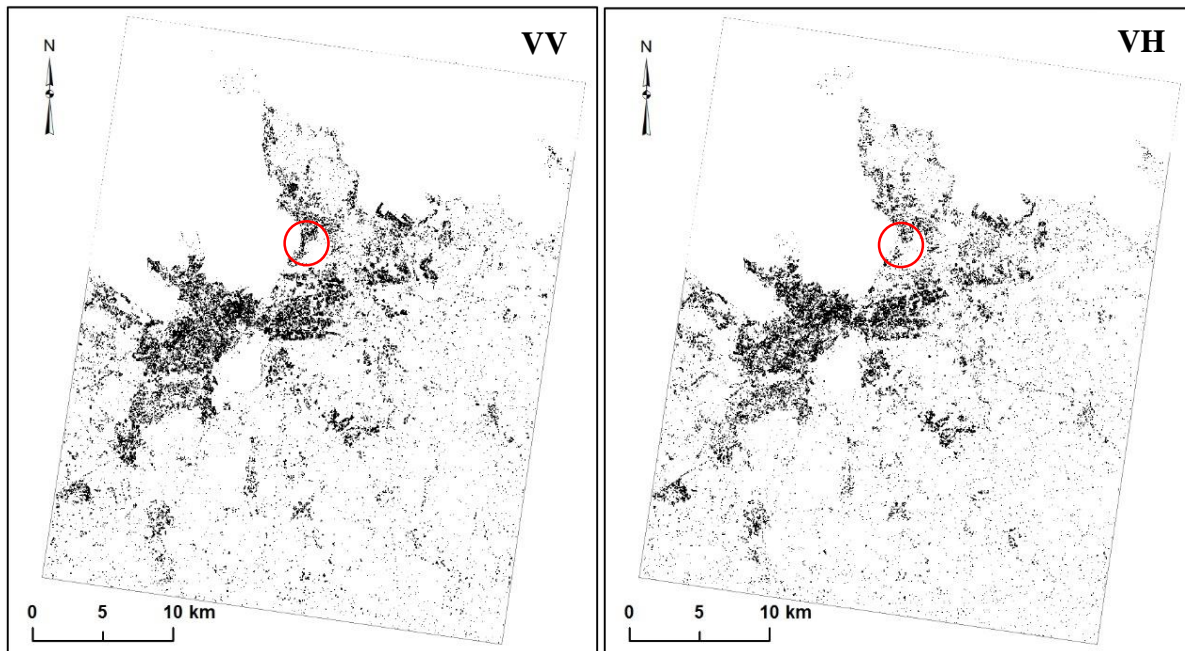
Teiseks on ehitiste ja loodusalade mediaani ja keskväärtuse vahe sarnasus sõltuvuses ehitiste orientatsioonist. Jooniselt 17 on näha, et VV-kanalis on punasega tähistatud alal tuvastatud ehitised, mis VH-kanalis loodusaladest ei eristu. See on tingitud radari vaatesuunast: VV-kanalis paistavad heledalt välja ehitised, mis on radarikiirte suhtes umbes 90° nurga all. VH-kanalis on sellise orientatsiooniga ehitiste signaal oluliselt madalam, mistõttu paistavad sama ala piksliväärtused VH-kanalis sarnased loodusaladega. Teisalt on VH-kanalis tuvastatud paremini joonisel 17 rohelisega tähistatud alal olevad ehitised, kuna need on radarikiirte suhtes ligikaudu 45° nurga all. Sellist ehitiste väljapaistmise iseärasust sõltuvalt nende orientatsioonist on välja toonud ka Hussin (1995) ja Henderson & Xia (1998).



Joonis 17. Tagasihajumise sõltuvus ehitiste orientatsioonist VV- ja VH-kanalis. Punasega tähistatud alal on toodud radari lennusuuna suhtes (ehitiste pildil markeeritud noolega) 90° nurga all olevad ehitised ning rohelisega tähistatud alal 45° nurga all olevad ehitised.

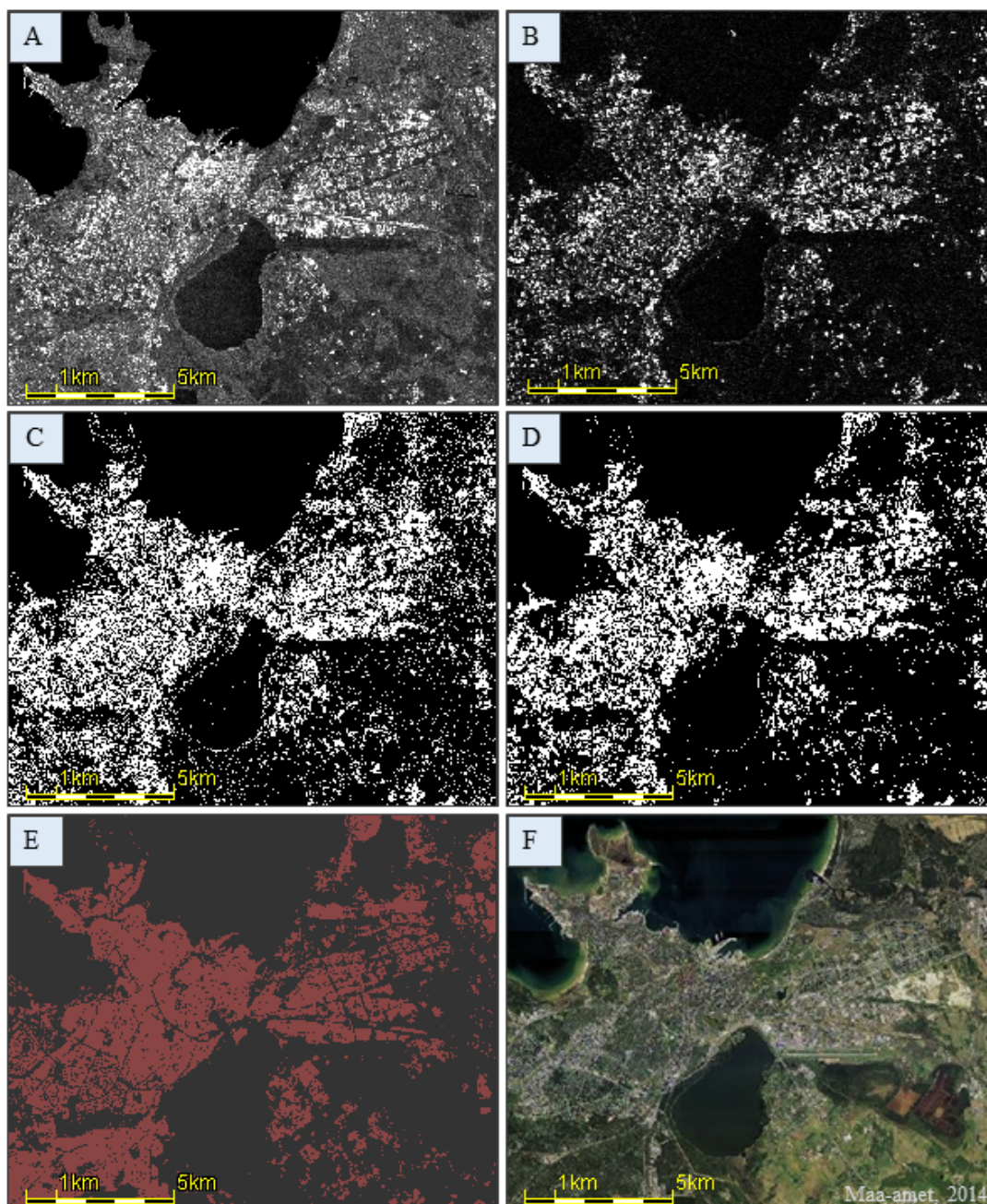
Kolmandaks võib loodusaladega sarnaseid väärtuseid anda tootmisõuede kaasamine ehitiste referentskihti. Tootmisõued kaasati, kuna paljud neist sisaldavad inimtekkelisi objekte. Teisalt sisaldavad osa neist ka ohtralt taimestikku. Kuna uuritavale alale jäi ligikaudu 1 000 tootmisõue, siis ei hakatud käsitsi sorteerima, millistes neist on valdavaks taimestik ja millistes inimtekkelised objektid, vaid ehitiste referentskihti liideti kõik tootmisõued. Neljandaks põhjustavad loodusaladega sarnaseid väärtuseid ehitiste varjud, mis jäävad paratamatult ehitiste referentsalade sisse.

VV- ja VH-kanali pildil tuvastatud ehitised on välja toodud joonisel 18. VV-kanalis saadi ehitiste ja loodusalade klassifitseerimisel kapa koefitsiendiks 0,48 ja klassifitseerimise kogutäpsuseks 74,0%. VH-kanalis on kapa koefitsient 0,43 ja klassifitseerimise kogutäpsus 71,5%. Kuigi VV-kanalis saadi 2,5% kõrgem klassifitseerimistäpsus, pole VV- ja VH-kanali täpsuse erinevus statistiliselt oluline, sest nende veamaatriksite võrdlemisel saadud Z-statistik on 1,20 (<1,96).



Joonis 18. Mustaga on tähistatud tuvastatud ehitised VV-kanalis (vasakul) ja VH-kanalis (paremal). Punasega tähistatud ringide suurendus on toodud välja joonisel 17.

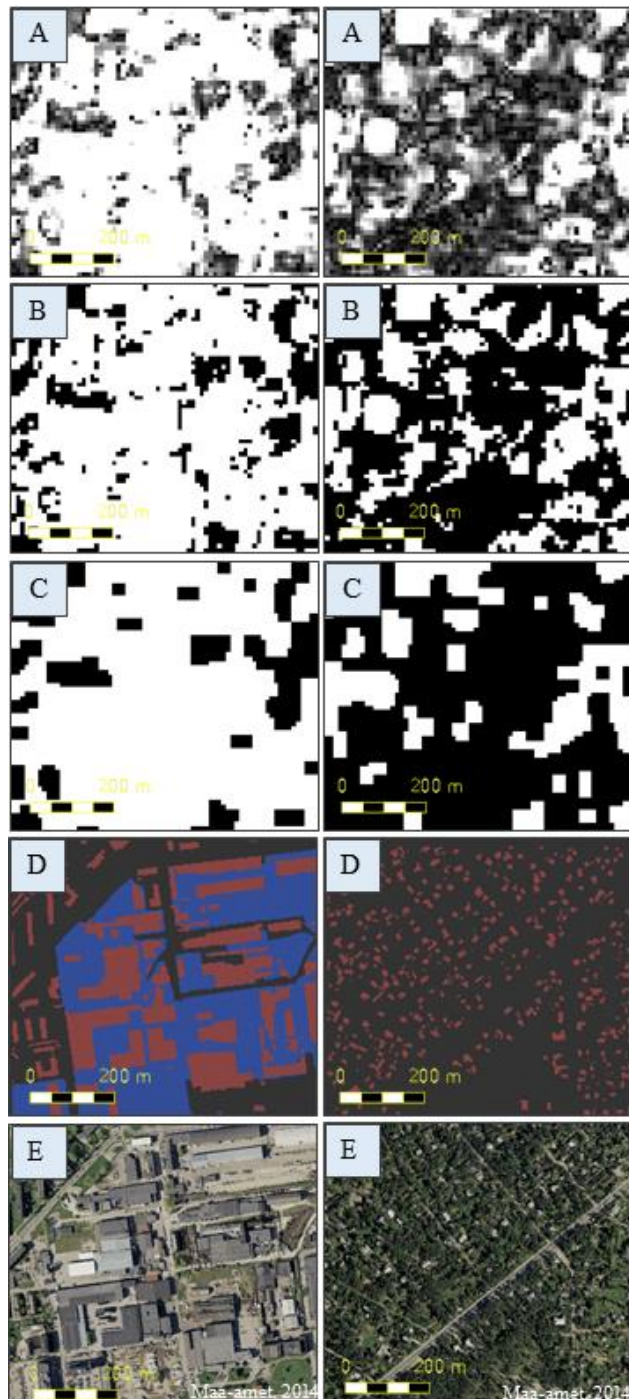
Täpsemalt on 23. oktoobri VV-kanali radaripildi andmetötluse vaheetappide tulemused toodud joonisel 19. Kuna töötlemata pildil (A) võivad amplituudi väärtused muutuda väga suures ulatuses, siis on ainuüksi selle põhjal universaalse ehitiste ja loodusalade piirväärtuse kehtestamine keeruline. Kuna keskväärtuse ja mediaani vahe (B) nii suures ulatuses ei muutu, võimaldab see meetod ehitisi loodusaladest tõhusamalt eristada. Lisaks võivad amplituudi pildil olla ka loodusalad (nt ülejutatud mets) väga heledad, kuid neile pole iseloomulikud järsud heleduse muutused nagu hoonestatud alade puhul. Keskväärtuse ja mediaani vahe meetod toimib paremini, sest otsitakse väikesel alal järske heleduse muutusi, mis on iseloomulikud peamiselt just ehitistele ja mitte loodusaladele. Ehitiste ja loodusalade vahelise piirväärtuse paikapanekul (antud töös loeti ehitisteks väljapoole loodusalade 95% jaotust jäävad alad) on ehitiste esinemine esialgu ülehinnatud (C), kuid morfoloogilise avamise ja sulgemise filtrite rakendamisel (D) puhastatakse pilti müra, eemaldades eraldiseisvad vale väärtusega pikslid.



Joonis 19. Andmetötluse vaheetappide tulemused 23. oktoobri VV-kanali radaripildil. (A) Töötlemata amplituudi pilt. (B) Keskvaartuse ja mediaani vahe, kus heledamad pikslid tähistavad ehitisi. (C) Binaarne tulempilt loodusalade ja ehitiste vahelise piirväärtuse paikapanekul, kus valged pikslid tähistavad ehitisi. (D) Morfoloogilise avamise ja sulgemise filtriga puhastatud tulem. (E) Ehitiste referentskiht, tähistatud punakaspruuniga (algandmed: ETAK). (F) Ortofoto (Maa-amet, 2014).

Jooniselt 20 paistab, et tööstusaladel esineb elamurajooniga võrreldes oluliselt rohkem kõrgeid keskvaartuse ja mediaani vahe väärtusi, mis tähistavad ehitisi. Kuna tööstuspiirkonnas on suuremad hooned, mis sisaldavad ka rohkem metalli, siis annavad need radaripildil tugevama signaali, kui üksikud väikesed hooned Nõmmel. Aedlinnas ei eristu ehitised radaripildil nii selgelt ka seetõttu, kuna need on ümbritsetud rohulusega ning osa

hooneid on osaliselt või täielikult puude varjus. Nõmmel on seega suurema osakaaluga ruumiline tagasihajumine taimestikult, mis pole nii tugev kui topeltpeegeldused hoonetelt. Elamurajoonidega võrreldes on tugevama radarisignaali esinemist tööstuspiirkondades välja toonud ka Ticehurst *et al.* (1996).

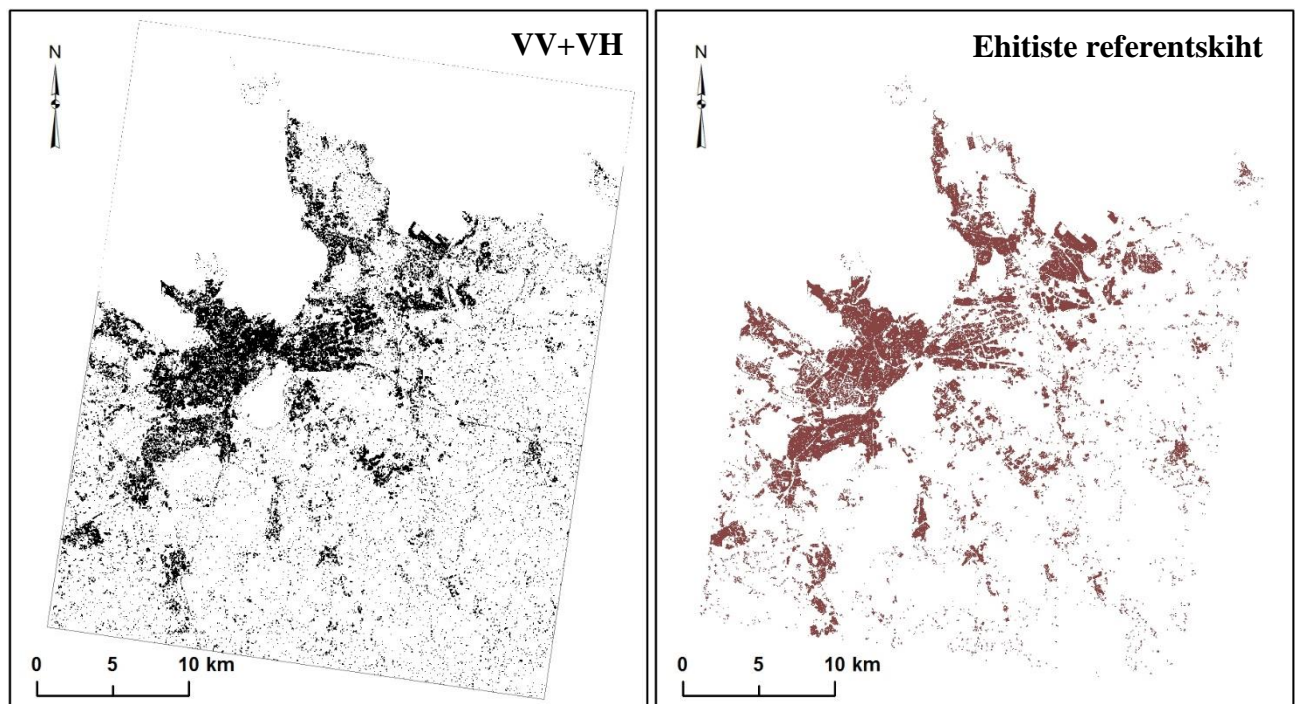


Joonis 20. Vasakul tulbas on toodud Lasnamäe tööstuspiirkond ja paremal Nõmme aedlinn. (A) Keskvaärtuse ja mediaani vahe VV-kanalis, heledamad pikslid tähistavad ehitisi. (B) Binaarne tulempilt loodusala ja ehitiste vahelise piirväärtuse paikapanekul, valged pikslid tähistavad ehitisi. (C) Morfoloogilise avamise ja sulgemise filtriga puhastatud tulem. (D) Ehitised (tähistatud punakaspruuniga) ja tootmisõued (tähistatud sinisega). Algandmed: ETAK. (E) Ortofotod (Maa-amet, 2014).

Kokkuvõtlikult võib välja tuua, et antud meetodi rakendamisel Sentinel-1A andmetel esineb nii VV- kui ka VH-kanalis märkimisväärne loodusalade ja ehitiste jaotusfunktsioonide kattuvus. See tuleneb peamiselt Sentinel-1A andmete ruumilisest lahutusest 20x22 m. VV- ja VH-kanali pildid andsid ehitiste ja loodusalade tuvastamisel võrdselt häid tulemusi, kogutäpsusega 70% piires. Võib eeldada, et lokaalse keskvaartuse ja mediaani vahele tuginev meetodika toimib kõrgema ruumilise lahutusega andmetel tõhusamalt. Edasistes uuringutes oleks huvitav täpsemalt võrrelda, mil määral erineb klassifitseerimistäpsus tööstus- ja äripiirkondades ning elamurajoonides.

3.2 VV- ja VH-kanali piltide kombineerimine

Kuna VV- ja VH-kanal on tundlikud erineva orientatsiooniga ehitistele, siis nende kombineerimine võimaldab tuvastada suuremat osa ehitistest (joonis 21). Kuiva ilma (23. oktoober 2014) VV- ja VH-kanali piltide kombineerimisel saadi kapa koefitsiendiks 0,64 ja klassifitseerimise kogutäpsuseks 82,2% (tabel 2). VV-kanalile VH-kanali lisamine parandas klassifitseerimise kogutäpsust 8,2% võrra ($Z = 4,38$, st erinevus on statistiliselt oluline).

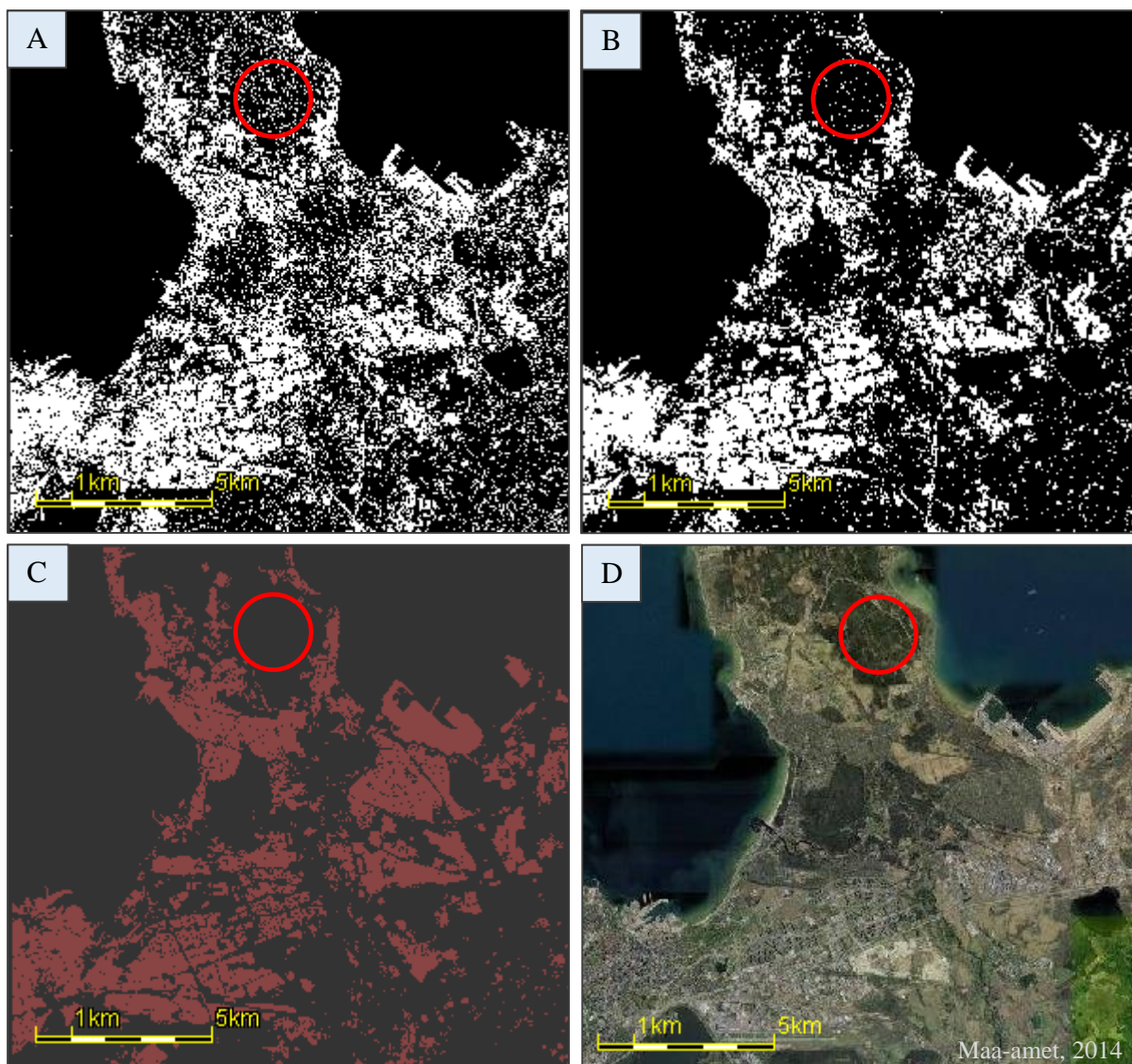


Joonis 21. Mustaga on tähistatud 95% piiri rakendamisel tuvastatud ehitised VV- ja VH-kanali kombineerimisel (vasakul) ning punakaspruuniga ehitiste referentskiht (paremal).

Tabel 2. 23. oktoobri VV- ja VH-kanali piltide kombineerimisel saadud veamaatriks.

Proгноositud klassid	Referentsklassid			
		ehitised	loodus	kokku
	ehitised	344	22	366
	loodus	156	478	634
	kokku	500	500	1000

Morfoloogilise avamise ja sulgemise filtrite rakendamine töödeldud radaripiltidel võimaldab ehitiste tuvastamise täpsust tõsta, eemaldades üksikud „saared“ ja „augud“ pildil ning muutes objektide kuju sujuvamaks. Kuna üksikud vale väärtusega pikslid eemaldatakse, joonistub linna-alade muster selgemalt välja. Nii on puhastamata (st filtreid rakendamata) 23. oktoobri VV- ja VH-kanali piltide kombineerimisel kapla koefitsient 0,57 ning klassifitseerimise kogutäpsus 78,7%. Morfoloogiliste filtrite kasutamisel tulemus paraneb: kapla väärtuseks saadi 0,64 ja kogutäpsuseks 82,2% ($Z = 1,98$). Samas on jooniselt 22 (B) näha, et isegi pärast pildi puhastamist müraest esineb punase ringiga tähistatud aladel üksikuid ehitiste pikseleid, mida ehitiste referentskihil näha pole. See võib olla tingitud asjaolust, et VV- ja VH-kanali kombineerimisel on 95% pikslite ehitisteks lugemise piir liiga madal ning parema tulemuse võib anda näiteks 96% või 97% piiri rakendamine.



Joonis 22. Andmetöötluse vaheetappide tulemused 23. oktoobri VV-kanali ja VH-kanali radaripildi kombineerimisel. (A) Binaarne tulempilt loodusalade ja ehitiste vahelise piirväärtuse paikapanekul, kus valged pikslid tähistavad ehitisi. (B) Morfoloogilise avamise ja sulgemise filtriga puhastatud tulem. (C) Punakaspruuniga on tähistatud ehitiste referentskiht (algandmed: ETAK). (D) Ortofoto (Maa-amet, 2014).

Seega tasub ehitiste tuvastamisel eelistada ühe polarisatsioonikanali kasutamise asemel VV- ja VH-kanali kombineerimist, kuna nii tuvastatakse radari lennusihi erinevate nurkade all olevad ehitised ning klassifitseerimise kogutäpsus on märkimisväärselt suurem. Vaid VV-kanali põhjal ehitisi tuvastades saadi täpsuseks 74,0%, VV- ja VH-kanali kombineerimisel tõusis klassifitseerimise kogutäpsus 82,2%-ni ($Z = 4,38$). Lisaks võib efektiivseks lugeda ka morfoloogilise avamise ja sulgemise filtrite kasutamise, sest nende rakendamine töödeldud radaripildidel 23. oktoobrist 2014 tõstis kogutäpsust 3% võrra ($Z = 1,98$).

3.3 Ilmastikutingimuste mõju ehitiste tuvastamisele

Ehitiste tuvastamise täpsuse hindamiseks sõltuvalt ilmastikutingimustest kasutati Sentinel-1A tõusva orbiidi pilte kuiva ilma kohta 27. detsembrist 2014 ja märja ilma kohta 8. jaanuarist 2015. Andmetöötlus viidi mõlema kuupäeva andmetel läbi nii VV- kui ka VH-kanalis (tabel 3). Märja ilma mõlema kanali pildil on loodusalade 95% vahemik tunduvalt laiem kui kuiva ilma puhul. Loodusalade laiem väärtusvahemik märja ilma puhul tuleneb vee kõrgest dielektrilisest läbitavusest, mis annab lisaks ehitistele tugeva tagasihajumise ka märjalt taimestikult nagu on välja toodud ka Euroopa Kosmoseagentuur (2014c) poolt. Seetõttu on märja ilma piltidelt ehitisi loodusaladest raskem eristada. Kuiva ilma radaripiltidel on ehitiste ja loodusalade kattuvus väiksem ning seega klassifitseerimistäpsus märja ilma piltidega võrreldes parem: VV-kanalis 5,7% ($Z = 2,52$) ja VH-kanalis 6,5% ($Z = 2,56$) parem.

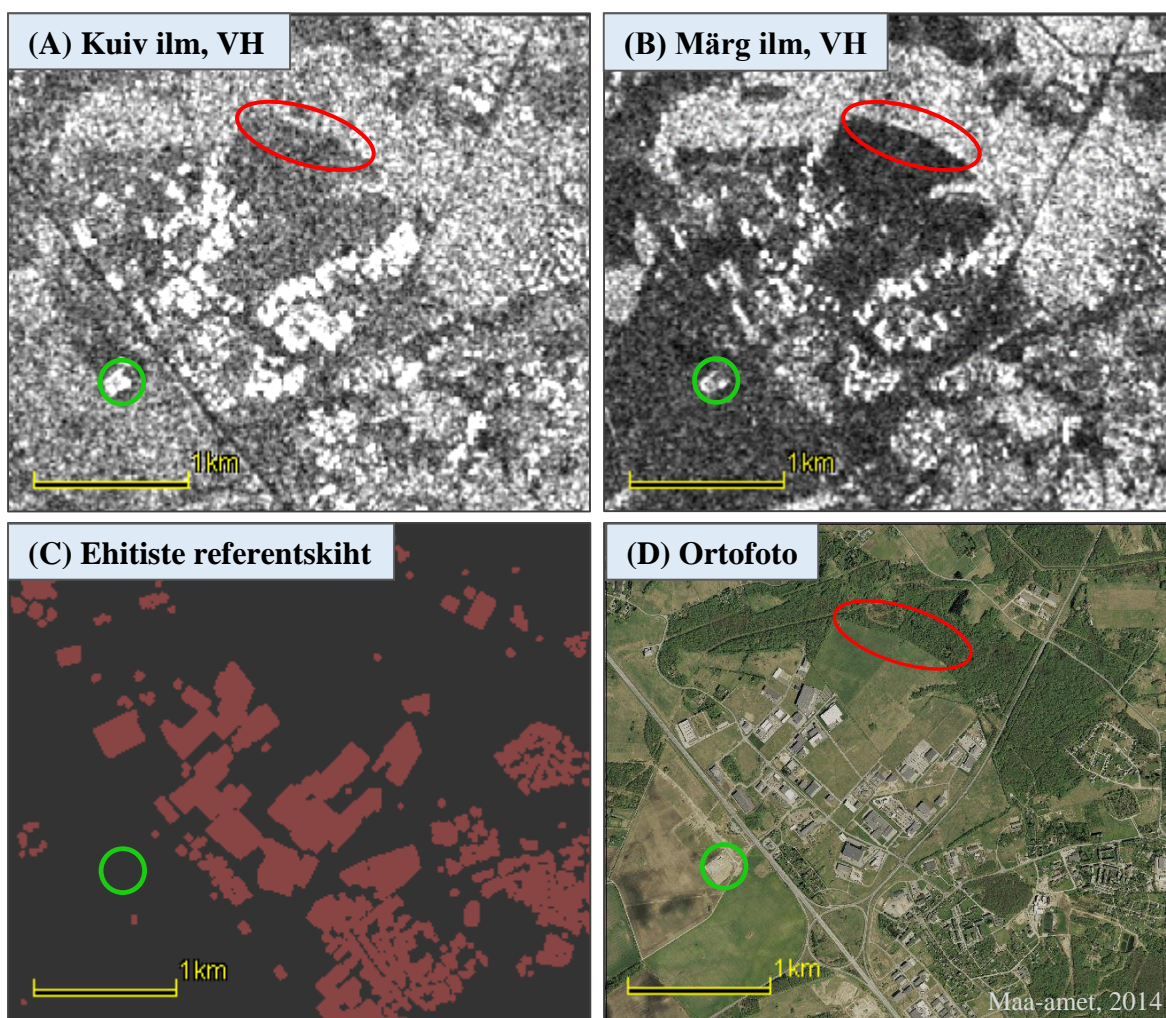
Kuigi ilmastikutingimustest olenemata saadi mõlemal kuupäeval VV-kanali piltidel kõrgem klassifitseerimistäpsus kui VH-kanalis, ei saa neid antud töös lugeda statistiliselt oluliseks: 27. detsembri VV- ja VH-kanali veamaatriksite võrdlusel saadi Z-statistiku väärtuseks 1,77 ning 8. jaanuari 2015 puhul saadi Z-statistikuks 1,81. Niisamuti ei saanud statistiliselt oluliseks lugeda ka alapeatükis 3.1 välja toodud 23. oktoobri VV- ja VH-kanali klassifitseerimistulemuste erinevust ($Z = 1,20$). Varasemalt on siiski Xia & Henderson (1997) välja toonud, et ehitiste tuvastamisel võib üldiselt paremaks lugeda VV-kanali pilte, kuna erinevalt ristkanalist on selle puhul peamiselt esinevaks tagasihajumismehhanismiks pinnapeegeldus, mis on linna-aladel domineeriv. Samuti on välja toonud Lee & Pottier (2009), et VH- ja HV-kanalis võib hoonestuselt vähesed difuusse hajumise tõttu eeldada pigem nõrka signaali, kuna difuusne tagasihajumine on iseloomulikum taimestikule.

Tabel 3. VV- ja VH-kanali pildi erinevused kuivade ja märgade ilmastikutingimuste korral.

	VV		VH	
Ilm	Kuiv	Märg	Kuiv	Märg
Loodusalade 95% vahemik	-23,6...9,0	-27,7...10,9	-11,2...4,5	-16,2...6,1
Ehitisi 95% loodusalade sees	48,2%	57,9%	54,8%	68,3%
Kapa koefitsient	0,45	0,34	0,37	0,24
Klassifitseerimise kogutäpsus	<u>72,5%</u>	66,8%	<u>68,6%</u>	62,1%

Kuivades ilmastikutingimustes on VV- ja VH-kanali piltide kombineerimisel saadud kapa koefitsient 0,57 ja klassifitseerimise kogutäpsus 78,4%, märja ilma puhul on need näitajad vastavalt 0,37 ja 68,7%. Kuiva ja märja ilma VV+VH veamaatriksite võrdlusele saadi Z-statistiku väärtuseks 4,61, st nende erinevus on statistiliselt oluline.

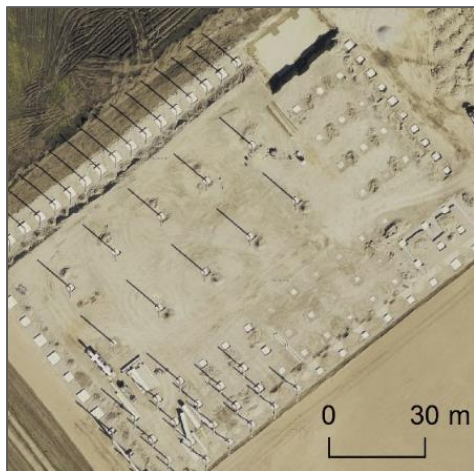
Joonisel 23 välja toodud töötlemata VH-kanali radaripiltidelt paistab, et märja ilma pilt on oluliselt kontrastsem. Märja ilma pildil on võimalik selgelt eristada näiteks metsa- ja põllumaa piire (joonisel 23 tähistatud punasega).



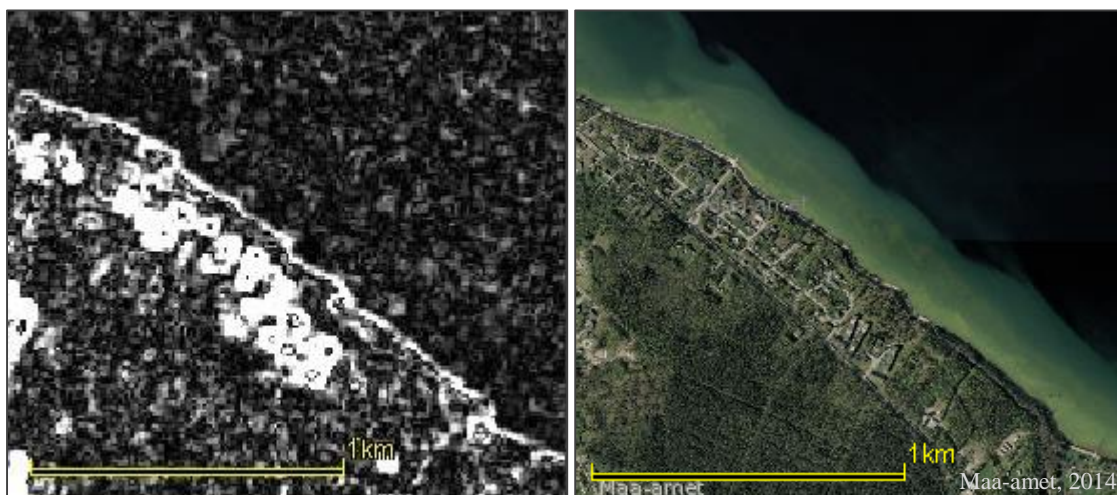
Joonis 23. (A) Kuiva ilma VH-kanali töötlemata radaripilt 27. detsembrist 2014. (B) Märja ilma VH-kanali töötlemata radaripilt 8. jaanuarist 2015. (C) Ehitiste referentskiht (algandmed: ETAK). (D) Ortofoto (Maa-amet, 2014). Rohelisega tähistatud ala suurendus ortofotol on välja toodud joonisel 24. Punane ellips tähistab metsa ja põllumaa ülemineku piiri.

Joonistelt 23 (tähistatud rohelisega) ja 24 paistab, et antud meetodiga klassifitseeritakse ehitisteks ka metallkonstruktsioonid, mida ehitiste referentskihis pole. Valesti klassifitseerimist esineb ka järsakute, metsaservade ja muude järskude kõrgusmuutustega

alade puhul. Kuna neil aladel on suur lokaalse keskväärtuse ja mediaani vahe, klassifitseeritakse need antud meetodiga ehitisteks (joonis 25).



Joonis 24. Metallkonstruktsioonid ortofotol (Maa-amet, 2014).

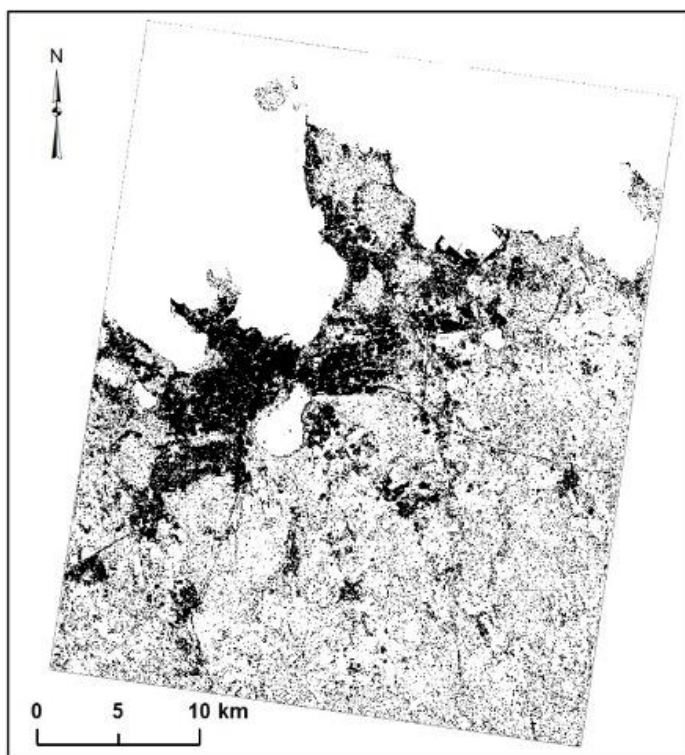


Joonis 25. Järsakute klassifitseerimine ehitisteks (tähistatud heledate pikslitega). Vasakul keskmise ja mediaani vahe VV-kanali pilt, paremal ortofoto (Maa-amet, 2014).

Ilmastikutingimuste mõju hindamisel ehitiste tuvastamisele leidis kinnitust asjaolu, et tasub eelistada kuiva ilma radaripilte. Kuna märja ilma pildidel annavad vee kõrge dielektrilise läbitavuse tõttu ka paljud loodusalad sarnaselt ehitistega väga tugeva signaali, siis on neid omavahel raskem eristada. Märja ilma pildiga võrreldes andis kuiva ilma pilt VV-kanalis 5,7% ($Z = 2,52$), VH-kanalis 6,5% ($Z = 2,56$) ning VV- ja VH-kanali kombineerimisel 9,7% ($Z = 4,61$) kõrgema klassifitseerimise kogutäpsuse.

3.4 Tõusva ja laskuva orbiidi piltide kombineerimine

Tõusva ja laskuva orbiidi VV- ja VH-kanali piltide kombineerimiseks kasutati Sentinel-1A andmeid 23. oktoobrist ja 27. detsembrist 2014. Eri orbiidi piltide koos kasutamine võimaldab tuvastada suuremat osa ehitistest, sest kombineeritakse kaks erinevat vaatesuunda (joonis 26). Laskuva orbiidi (hommikune) ülelend toimub Eesti laiuskraadidel asimuudil 192° vaatega paremale (lääne ja loode vaheline suund) ja tõusva orbiidi (õhtune) ülelend asimuudil 348° vaatega paremale (ida ja kirde vaheline suund). Seega on lisaks sama hoone vastaskülgede nägemisele ka lennusihiid 24° erinevad. Tõusva ja laskuva orbiidi VV- ja VH-kanali piltide kombineerimine annab võrreldes ainult langeva orbiidi piltide kasutamisega parema tulemuse: kapa koefitsient on 0,78 ja klassifitseerimise kogutäpsus 89,1% ($Z = 4,44$) (tabel 4). Visuaalselt paistab aga ehitiste esinemine radaripildil ülehinnatud: ehitistele viitavaid musti täppe esineb rohkesti ka loodusaladel. Lahenduseks võib olla rangemate klassifitseerimise läviväärtuste kehtestamine.



Joonis 26. Mustaga on tähistatud tõusva ja langeva orbiidi radaripildi VV- ja VH-kanali kombineerimisel tuvastatud ehitised.

Tabel 4. Tõusva ja laskuva orbiidi VV- ja VH-kanali kombineerimisel saadud tulemuste veamaatriks.

Proгноositud klassid	Referentsklassid			
		ehitised	loodus	kokku
	ehitised	440	49	489
	loodus	60	451	511
	kokku	500	500	1000

Käesolevas töös kasutati Sentinel-1A IW-režiimi andmeid, mille langemisnurk jääb vahemikku 29-46°. Edasistes uurimustes võiks lähemalt uurida langemisnurga mõju ehitiste tuvastamisele.

Tõenäoliselt referentskihi väljavõtte ja kasutatud radaripiltide ajavahe (9. jaanuar 2015 vs 23. oktoober 2014 – 8. jaanuar 2015) ehitiste tuvastamise täpsust antud töös oluliselt ei mõjuta, kuna varaseimast kasutatud radaripildist (23. oktoober 2014) on referentskihi väljavõtte tegemiseni andmebaasi lisatud 0,37% ehitisi.

Antud töös välja toodud klassifitseerimise kogutäpsuste puhul tuleb arvestada, et tegu on nn treeningtäpsustega, kuna piirväärtuste määramine teostati samadel andmetel, mille põhjal kontrolliti täpsust. Sisuliselt näitab see, kui hästi mudel töötab selle loomisel aluseks võetud andmetel. Selleks, et hinnata, kas mudel töötab ka väljaspool selle aluseks olevaid andmeid, oleks vaja eraldada kontrollvalim enne piirväärtuste leidmist või leida kontrolltäpsus hoopis uuel alal.

Edasistes uurimustes võiks töödeldud radaripilte valideerida üldise loodusala kihi asemel erinevate maakattetüüpide vastu. Nii oleks võimalik tuvastada, millistest maakattetüüpidest ehitised kõige paremini eristuvad ning milliste puhul esineb kõige enam vigu. Lisaks lävendi määramise põhisele metoodikale võiks uurida ka muude klassifitseerimismeetodite võimekust (nt näidistega klassifitseerimine, logistiline regressioon, tugivektormasin).

Kokkuvõte

Kogu maailma linna-alad on pidevas muutumises ning see toob kaasa vajaduse sageli uuendada linnade ulatuse kaarte. Hoonestatud alade muutuste kaardistamiseks võib üheks sobivaimaks vahendiks pidada radarkaugseiret.

Käesoleva töö eesmärk oli töötada välja täpne metoodika ehitiste tuvastamiseks radaripiltidelt. Selleks kasutati radarsatelliidi Sentinel-1A pilte ruumilise lahutusega 20x22 m Tallinnast ja selle lähiümbrusest. Tulemused näitasid, et ehitiste ja loodusalade eristamises andsid VV- ja VH-kanal võrselt häid tulemusi. Kuigi VV-kanali pildil saadi klassifitseerimise kogutäpsuseks 74% ja VH-kanali pildil 71,5%, ei saa käesolevas töös nende erinevust lugeda statistiliselt oluliseks. Kuna VV- ja VH-kanal on tundlikud erineva orientatsiooniga ehitistele, siis nende kombineerimisel tõusis klassifitseerimise kogutäpsus 82,2%-ni.

Kuigi radarkaugseiret ei sega pilved ja nõrgad vihmajärged, mõjutab ehitiste tuvastamise efektiivsust maapinna niiskus. Nimelt suureneb märja ilmaga tagasihajunud signaal taimestikult ja maapinnalt. Kuna tugev tagasihajumine on iseloomulik ka ehitistele, võivad need radaripildil muutuda niiskest taimestikust ja maapinnast raskesti eristatavaks. Ka antud töös selgus, et nii VV- kui ka VH-kanalis oli kuiva ilma piltide klassifitseerimise kogutäpsus ligikaudu 6% suurem kui märja ilma piltide puhul. Mõlema polarisatsiooni kombineerimisel andis aga kuiva ilma piltide kasutamine ligikaudu 10% paremaid tulemusi (kuiva vs märja ilma pildi klassifitseerimise kogutäpsus: 78,4% ja 68,7%).

Kõige kõrgem klassifitseerimistäpsus Sentinel-1A andmetelt saadi tõusva ja laskuva orbiidi VV- ja VH-kanali piltide kombineerimisel – 89,1%. Eri orbiidi piltide kombineerimine võimaldab tuvastada suuremat osa ehitistest, sest kombineeritakse kaks erinevat vaatesuunda. Tänu sellele on võimalik näha samade ehitiste vastaskülgi, mis vaid ühe orbiidi piltide kasutamisel jääks varju, mistõttu nende alade kohta signaal radarini tagasi ei jõuaks. Edasistes uurimustes võiks töödeldud radaripilte valideerida üldise loodusalade kihi asemel erinevate maakattetüüpide vastu. Nii oleks võimalik täpsemalt tuvastada, millistest maakattetüüpidest ehitised kõige paremini eristuvad ning millised tekitavad kõige enam vigu.

Üldiselt eristusid tööstuspiirkonnad radaripildil paremini kui väikeste majadega elamurajoonid, kuna tööstuspiirkondades on reeglina suuremad hooned, mis annavad tugevama signaali kui üksikud rohelusega ümbritsetud elumajad. Kuna välja töötatud metoodika on tundlik järskudele heledusmuutustele, siis antud meetodi piiranguks on

metallkonstruktsioonide, pankrannikute, metsaservade ja muude järskude heledusmuutustega alade klassifitseerimine ehitisteks. Lisaks pole tulenevalt Sentinel-1A ruumilisest lahutusest 20x22 m võimalik tuvastada üksikute ehitiste piire. Seevastu võib metoodikat pidada heaks linna-alade piiritlemisel regionaalsel tasemel.

Detecting built-up areas from radar satellite Sentinel-1A measurements

Anni Sisäs

Summary

The world is facing a rapid growth of urbanisation, especially in developing countries. For sustainable development, accurate and timely information about the current situation, past dynamics and on-going trends is essential. For continuous monitoring of cities, radar remote sensing can be considered one of the best means.

The aim of the current work was to develop a precise methodology for detecting built-up areas from radar imagery. For that purpose, radar satellite Sentinel-1A images with spatial resolution of 20x22 m from Tallinn city and its surroundings were used. The developed method comprises of the difference between local mean and median for distinguishing between built-up and natural areas. Data processing was performed in Sentinel-1 Toolbox and NEST software.

It was found that both VV- and VH channel gave similar results. Although the overall classification accuracy of distinguishing between built-up and natural areas was for VV-channel image 74% and VH-channel image 71,5%, the difference between them was not considered as statistically significant. However, as VV- and VH-channel are sensitive to different orientations of the buildings, by combining those images the overall classification accuracy increased to 82,2%.

The efficiency of detecting built-up areas also depends on the weather conditions. As water has very high dielectric constant, the presence of moisture in either soil or vegetation will result in significantly higher reflectivity. Therefore, the backscattering from wet vegetation and ground is remarkably similar to buildings, making it difficult to distinguish between them. It was seen that both VV- and VH-channel images from dry weather gave approximately 6% better classification accuracy compared with wet weather. By combining images with both polarisation, images from dry weather gave around 10% better classification results (dry and wet weather overall classification accuracy is 78,4% and 68,7% respectively). On the other hand, images from wet weather conditions are more suitable for identifying the boundaries of forest and agricultural land.

The highest overall classification accuracy from Sentinel-1A imagery was obtained by combining ascending and descending orbit images from VV- and VH-channel: 89,1%. Combining images from different orbits enables to identify buildings to a greater extent, as two different look directions are combined. As a result, it is possible to see the opposite sides of the same buildings. By using images only of one orbit, the opposite sides of buildings would be in shadow and therefore no signal returns back to radar.

In general, compared with residential areas, industrial areas are distinguished better on radar images. The reason for this is likely in the different size and the amount of metal constructions between the industrial and residential buildings. Industrial buildings contain more metal constructions and have bigger walls forming bigger dihedral and trihedral reflectors thus resulting in stronger radar backscatter than dwelling houses, which are often surrounded by vegetation. As the developed methodology is sensitive to rapid changes in radar backscatter, metal constructions, cliffs and other areas with rapid backscatter changes are misclassified as buildings. Another limitation is that due to Sentinel-1A spatial resolution it is not possible to identify the boundaries of individual buildings. On the other hand the developed methodology can be considered efficient for detecting built-up areas at the regional level.

Tänuavaldused

Suur tänu minu juhendajale Kaupo Voormansikule, kes on mind pühendumusega õpetanud ning jaganud asjakohaseid soovitusi töö kirjutamisel. Tänan ka oma kaasjuhendajat Tanel Tamme heade nõuannete eest eelkõige täpsushinnangute läbiviimisel. Lõpetuseks soovin tänada ka oma perekonda, kes on mulle alati toeks olnud.

Kasutatud kirjandus

Basly, L., Cauneau, F., Ranchin, T. & Wald, L., 1999. SAR imagery in urban area. Valladolid, EARSeL Symposium 1999 "Remote sensing in the 21st Century: economic and environmental applications".

Baudot, Y., 2001. Geographical Analysis of the Population of Fast-Growing Cities in the Third World. In: Donnay, J. P., Barnsley, M. J. & Longley, P. A. eds. Remote Sensing and Urban Analysis. London: Taylor & Francis, pp. 225-242.

Congalton, R. & Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis.

Cumming, I. & Wong, F., 2005. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Boston; London: Artech House Inc.

Del Frate, F., Pacifici, F. & Solimini, D., 2008. Monitoring Urban Land Cover in Rome, Italy, and Its Changes by Single-Polarization Multitemporal SAR Images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 1(2), pp. 87-97.

Dong, Y., Forster, B. & Ticehurst, C., 1997. Radar backscatter analysis for urban environments. International Journal of Remote Sensing, 18(6), pp. 1351-1364.

Esch, T., Taubenböck, H., Roth, A., Heldens, W., Felbier, A., Thiel, M., Schmidt, M., Müller, A. & Dech, S., 2012. TanDEM-X mission – new perspectives for the inventory and monitoring of global settlement patterns. Journal of Applied Remote Sensing, 6(1), pp. 1-21.

Esch, T., Thiel, M., Schenk, A., Roth, A., Muller, A. & Dech, S., 2010. Delineation of Urban Footprints From TerraSAR-X Data by Analyzing Speckle Characteristics and Intensity Information. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(2), pp. 905-916.

Euroopa Kosmoseagentuur, 2013. Sentinel-1 User Handbook.

Forster, B. C., 2006. Principles and Tools for Remote Sensing of Human Settlements. In: Ridd, M. & Hipple, J. eds. Remote sensing of human settlements. Bethesda: American society for photogrammetry and remote sensing, pp. 37-206.

- Henderson, F. M. & Herrig, K., 1996. Wavelength, Polarization and Incident Angle as Variables in Settlement Detection with Satellite SAR Imagery. Vienna, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Henderson, F. M. & Xia, Z., 1998. Radar Applications in Urban Analysis, Settlement Detection and Population Estimation. In: Henderson, F. M. & Lewis, A. J. eds. Radar Fundamentals: Technical Perspective. New York: Wiley, pp. 733-768.
- Hussin, Y. A., 1995. Effect of polarization and incidence angle on radar return from urban features using L-band aircraft radar data. Firenze, IEEE.
- Jensen, J. R., 2000. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. New Jersey: Prentice Hall.
- Lee, J. & Pottier, E., 2009. Polarimetric Radar Imaging – from Basics to Applications. 1st ed. New York: CRC Press.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. & Chipman, J. W., 2008. Remote Sensing and Image Interpretation. 6nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Li, X., Pottier, E., Guo, H. & Ferro-Famil, L., 2010. Urban land cover classification with high-resolution polarimetric SAR interferometric data. Canadian Journal of Remote Sensing, 36(3), pp. 236-247.
- Purkis, S. & Klemas, V., 2011. Remote Sensing and Global Environmental Change. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Raney, R. K., 1998. Radar Fundamentals: Technical Perspective. In: Henderson, F. M. & Lewis, A. J. eds. Manual of remote sensing. New York: Wiley, pp. 9-130.
- Rees, G., 1999. The Remote Sensing Data Book. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, S. W., 1999. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. 2nd ed. San Diego: California Technical Publishing.
- Strozzi, T. & Wegmuller, U., 1998. Delimitation of urban areas with SAR interferometry. Seattle, IEEE.

Taubenböck, H., Esch, T., Felbier, A., Roth, A., Dech, S., 2011. Pattern-Based Accuracy Assessment of an Urban Footprint Classification Using TerraSAR-X Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 8(2), pp. 278-282.

Taubenböck, H., Felbier, A., Esch, T., Roth, A., Dech, S., 2012. Pixel-based classification algorithm for mapping urban footprints from radar data: a case study for RADARSAT-2. Canadian Journal of Remote Sensing, 38(3), pp. 211-222.

Ticehurst, C., Forster, B. & Dong, Y., 1996. Using backscatter from radar images for classifying and determining the bulk density of the urban environment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 31, pp. 709-713.

ÜRO, 2014. World Urbanization Prospects. The 2014 Revision, New York.

Xia, Z. G. & Henderson, F. M., 1997. Understanding the relationships between radar response patterns and the bio- and geophysical parameters of urban areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(1), pp. 93-101.

Internetiallikad:

Esri, 2013. ArcGIS for Desktop. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop/free-trial> (21.03.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2015. The Sentinel-1 Toolbox. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1> (14.03.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2014a. Geometry Glossary. <https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-5.html> (21.03.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2014b. NEST - Next ESA SAR Toolbox. <https://earth.esa.int/web/nest/home> (21.03.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2014c. Scientific Background. <https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR1-1-2.htm> (22.02.2015).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2010. NEST Online User Manual, Orthorectification. <http://corp.array.ca/nest-web/help/operators/RangeDopplerGeocodingOp.html> (21.03.2015).

Mathsoft, 2011. www.mathsoft.com (22.05.2015)

NASA, 2005. Shuttle Radar Topography Mission.

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/statistics.html> (06.02.2015).

Natural Resources Canada, 2014. Target Interaction and Image Appearance.

<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9311> (22.02.2015).

Riigi Ilmateenistus, 2015. Vaatlusandmed.

<http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/> (24.05.2015).

Tele-Rilevamento Europa, 2015. SAR Imagery. <http://treuropa.com/technique/sar-imagery/> (13.04.2015).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anni Sisas,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ehitiste tuvastamine radarsatelliidi Sentinel-1A andmete põhjal“, mille juhendajad on Kaupo Voormansik ja Tanel Tamm,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **25.05.2015**